Oksitli Bir Altın Cevherinin Knelson Ayırıcısı Kullanılarak Zenginleştirilebilme Olanaklarının Araştırılması

Sercan Sevgül

YÜKSEK LİSANS

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2023

Investigation on the Possible Concentration of Oxidized Gold Ores in the Knelson Concentrator

Sercan Sevgül

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

January 2023

Oksitli Bir Altın Cevherinin Knelson Ayırıcısı Kullanılarak Zenginleştirilebilme Olanaklarının Araştırılması

Sercan Sevgül

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Volkan Bozkurt

İkinci Danışman: Arş. Gör. Dr. Semih Oluklulu

Ocak 2023

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Volkan Bozkurt ve Arş. Gör. Dr.Semih Oluklulu danışmanlığında hazırlamış olduğum "Oksitli Bir Altın Cevherinin Knelson Ayırıcısı Kullanılarak Zenginleştirilebilme Olanaklarının Araştırılması" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

16/01/2023

Sercan SEVGÜL

İmza

ÖZET

Bu çalışmada, 4,57 g/t Au içeriğine sahip oksitli bir altın cevherinin, Knelson ayırıcısı (MD3 laboratuvar ölçekli) kullanılarak zenginleştirilebilme olanakları araştırılmıştır. Bu kapsamda, istatiksel deney tasarımı yöntemlerinden faydalanılarak, en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında etkisi incelenen çalışma parametreleri; G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranıdır. Deneysel çalışmalara ait sonuçların değerlendirilmesi, elde edilen konsantrelerin altın tenörü ve verimi kullanılarak istatistiksel olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel verilerin yardımıyla G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranı parametrelerinin altın tenörü ve verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyan modeller oluşturulmuştur. Ayrıca, parametrelerin etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri, ANOVA verileri ve yüzey cevap grafikleri ile tartışılmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, tenörün öncelendiği durumda, 44,4 g/t Au içeren bir konsantre, %70,8 verimle, 60 G kuvvetinde, 250 rpm besleme hızında, 3 l/dk yıkama suyu debisinde ve %40 katı oranında elde edilmiştir. Verimin öncelendiği durumda ise, 33,9 g/t Au içeren bir konsantre, %76,8 verimle, 100 G kuvvetinde, 250 rpm besleme hızında, 2 l/dk yıkama suyu debisinde ve %20 katı oranında elde edilmiştir.

Deney sonuçları ile gerçekleştirilen ANOVA analizleri sonucunda, tenör ve verim için modeller oluşturulmuştur. Tenör için oluşturulan model, 0,8762 R^2 değeri ile verim için oluşturulan model ise, 0,8685 R^2 değeri ile istatistiksel olarak anlamlıdır. Oluşturulan bu modeller ile tahmin edilen tenör ve verim değerlerinin, deneysel verilerle yüksek bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin, tenör ve verim ile olan ilişkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri tartışılmıştır. İlave olarak, taze cevher ve tenörün öncelendiği durumda elde edilen Knelson ayırıcısı artığına Bottle Roll testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda, gravite zenginleştirmesini takiben gerçekleştirilen liç işlemi ile liç süresinin 48 saatten 10 saate düştüğü, siyanür tüketiminin ise 0,76 kg/mt'dan 0,50 kg/mt'a azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: altın cevheri, Knelson ayırıcısı, deney tasarımı, siyanür liçi

SUMMARY

In this study, the concentration possibilities of an oxidized gold ore with an Au content of 4.57 g/t using a Knelson separator (MD3 laboratory scale) were investigated. In this context, it is aimed to determine the most suitable operational conditions by using statistical experimental design methods. The study parameters whose effects were examined within the scope of the study were G force, wash water, feed rate, and solids ratio. Evaluation of the experimental studies was carried out statistically using the gold grade and recovery of the concentrates obtained. With the help of statistical data, models revealing the effects of G force, wash water, feed rate, and solids ratio parameters on gold grade and recovery were established. In addition, the effects of the parameters and their interactions were discussed based on ANOVA and response surface graphs.

As a result of the experiments, when grade was prioritized, a concentrate containing 44,4 g/t Au was obtained with a 70,8% recovery at 60 G force, 250 rpm feed rate, 3 l/min wash water rate, and 40% solids ratio. In the case where the recovery was prioritized, a concentrate containing 33,9 g/t Au was obtained with a 76,8% recovery at 100 G force, 250 rpm feed rate, 2 l/min wash water rate, and a 20% solids ratio.

As a result of the ANOVA analyzes performed on the experimental results, models were established for grade and recovery. The model established in the case of grade was statistically significant, with an R^2 value of 0,8762. The model established for recovery was also statistically significant with an R^2 value of 0,8685. Grade and recovery values estimated by these models were found to be in high agreement with the experimental data. The relations of the parameters with grade and recovery and their interactions with each other were discussed as well. In addition, bottle roll tests were conducted on fresh ore and KC tailings obtained under determined conditions. As a result of bottle roll tests, it was found that gravity concentration prior to leaching lowered both retention time and cyanide consumption from 48 hours to 10 hours and 0,76 kg/mt to 0,50 kg/mt, respectively.

Keywords: gold ore, Knelson Concentrator, design of experiment, cyanide leaching

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **3**
2.1. Altının Özellikleri 4
2.2. Altın Mineralleri 5
2.3. Altının Oluşumu ve Sınıflandırılması 6
2.3.1. Plaser tipteki cevherler 7
2.3.2. Serbest altın içeren altın cevherleri 8
2.3.3. Oksitli altın cevherleri 8
2.3.4. Altın-tellür cevherleri 9
2.3.5. Karbon kökenli altın cevherleri 10
2.3.6. Sülfürlü altın cevherleri 11
2.4. Altın Zenginleştirme Yöntemleri 13
2.4.1. Gravite ayırması 13
2.4.2. Hidrometalürjik (liç) yöntemler 18
2.4.3. Flotasyon 21
2.4.4. Amalgamasyon 22
2.4.5. Aglomerasyon 23
3. KNELSON AYIRICISI **24**
3.1.1. Knelson ayırıcısının çalışma prensibi 25
3.1.2. Kesikli tip Knelson ayırıcıları 26
3.1.3. Sürekli tip Knelson ayırıcıları 28
4. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI **29**

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1. Klasik Yöntem 30
4.2. İstatistiksel Yöntemler 30
4.3. Deney Tasarımı Aşamaları 31
4.4. Varyans Analizi (ANOVA) 32
4.5. Faktöriyel tasarımlar 34
4.5.1. Tam faktöriyel tasarımlar 35
4.5.2. Kesirli faktöriyel tasarımlar 36
4.5.3. Plackett-Burman tasarımı 37
4.5.4. Taguchi yöntemi 37
4.6. Cevap Yüzey Yöntemleri 38
4.6.1. Merkezi Kompozit Tasarım 38
4.6.2. Box-Behnken 40
5. MATERYAL VE YÖNTEM 41
5.1. Materyal 41
5.2. Yöntem 44
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 47
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 61
KAYNAKLAR DİZİNİ 63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Eagles Nest Madeninden çıkarılmış nabit altın (Kaliforniya, ABD)..... 5
2.2. Elektrum halinde bulunan altın (Round Mountain, ABD) 6
2.3. Cresson Madeninden çıkartılan bir kaleverit minerali (Colarado, ABD)..... 6
2.4. Yapısal açıdan altın cevherlerinin gruplandırılması..... 7
2.5. Çözünmüş altını adsorplayan cevherlere uygulanan işlemler 11
2.6. Altın zenginleştirme yöntemleri 13
2.7. Tane boyutuna bağlı olarak uygulanan gravite yöntemleri (Çilingir, 1996) 14
2.8. HCN ve CN^- nin pH'a bağlı meydana gelme grafiği 19
2.9. Liç yöntemleri 20
3.1. Knelson ayırıcısının (a) düşey ve yatay kesiti, (b) genel görünümü 24
3.2. Knelson ayırıcısının iç koniğinin şematik görüntüsü 25
3.3.Knelson ayırıcısı modelleri..... 26
3.4. Labarutuvar tipi Knelson ayırıcısının fotoğrafı ve şematik görünüşü..... 28
4.1. Olasılık grafiği..... 33
4.2. Faktör sayısına göre deney sayısının değişimi 36
4.3. Alfa değerine göre CCD türleri 39
4.4. Üç faktörlü Box-Behnken tasarımı..... 40
5.1. Cevherin tane boyu dağılım grafiği..... 42
5.2. Retsch AS200 TAP, Retcsh numune bölücü ve ESSA çubuklu değirmen 42
5.3. Tüvenan cevhere ait XRD spektrumu 43
5.4. Cevhere ait EDX analizi..... 44
6.1. Deneysel ve model tahmini verilerin karşılaştırılması a) Tenör b) Verim..... 50
6.2. G kuvveti ve besleme hızının altın tenörü üzerindeki etkisi 51
6.3. G kuvveti ve besleme hızının altın verimi üzerindeki etkisi 52
6.4. G kuvveti ve yıkama suyunun altın tenörü üzerindeki etkisi 52
6.5. G kuvveti ve yıkama suyunun altın verimi üzerindeki etkisi 53
6.6. G kuvveti ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi 54
6.7. G kuvveti ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi 55
6.8. Besleme hızı ve yıkama suyunun altın tenörü üzerindeki etkisi 55
6.9. Besleme hızının ve yıkama suyunun altın verimi üzerindeki etkisi 56
6.10. Besleme hızının ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi 57
6.11. Besleme hızı ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi 58
6.12. Yıkama suyu ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi..... 59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.13. Yıkama suyu ve katı oranının verim üzerindeki etkisi 59
6.14. Doğrudan liç ve Knelson ayırıcısı sonrası liçin zamana bağlı Au verimleri 60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Altının Kimyasal ve fiziksel özellikleri 4
3.1. Kesikli tip Knelson ayırıcılar ve teknik özellikleri 27
3.2. Sürekli tip Knelson ayırıcılar ve teknik özellikleri 28
4.1. Varyans analizi tablosu 34
4.2. 2^4 tam faktöriyel tasarım matrisi 35
4.3. 2^4 faktöriyel tasarımın ¼ kesirli tasarım matrisi 37
5.1. Tüvenan cevhere ait kimyasal analizler 43
5.2. Tüvenan cevherde fraksiyonlara göre altın dağılımı 43
5.3. CCD dizayn parametre ve seviyeleri 45
5.4. Gerçek ve kodlanmış değerler için oluşturulan CCD Tasarım matrisi 46
6.1. Verim ve tenor değerlerinin tasarım matrisinde gösterimi 47
6.2. Tenöre ait ANOVA tablosu 48
6.3. Verime ait ANOVA tablosu 49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
μm	Mikro metre
α	alfa
F	Faktöriyel nokta sayısı
g	Yer çekimi kuvveti
k	Faktör sayısı
n	Deney sayısı
p	Olasılık
sd	Serbestlik derecesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
AAS	Atomik absorpsiyon spektrometresi
CCD	Central Composite Design
CIL	Carbon in leach
CIP	Carbon in pulp
CN	Siyanür
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy
EDX	Energy dispersive X-Ray
KC	Knelson Concentrator
KO	Kareler ortalaması
KT	Kareler toplamı
OFAT	One factor at a time
PGM	Platin grubu metaller
POX	Pressure oxidized extraction
RSM	Response surface methodology
SEM	Scanning electron microscopy
XRD	X-Ray diffraction

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Altın, insanlık tarihi boyunca en çok rağbet gören metal olmuştur. Günümüzde altın gerek ekonomik gerekse teknolojik sebeplerden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze insanların finansal enstrüman olarak kullandığı altın, pek çok toplumun beşeri olarak şekillenmesine ön ayak olmuş, teknolojinin gelişimi ile beraber, finansal bir araç olmanın ötesine geçip, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı aranan bir malzeme haline gelmiştir (Craig ve Rimstidt, 1998).

Altın, doğada nabit altın ve/veya gümüş, bakır veya platin gibi metalleri içeren çeşitli alaşımlar halinde bulunmaktadır. Altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde gravite yöntemleri, flotasyon, siyanür liçi ve amalgamasyon yöntemleri kullanılabilmektedir. Siyanür liçi, altın zenginleştirme yöntemleri arasında en yaygın olandır ve dünyada altın üretiminin; %83-85'i siyanür liçi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Altın üretiminde flotasyon %10-14 paya sahipken, gravite ayırmasının payı %5-10 arasındadır. Altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde uygulanacak yöntemin seçimi, cevherin mineralojik, jeolojik, metalürjik özellikleri ile cevher yatağının çevresel ve coğrafik faktörleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir (Marsden ve House, 2007).

Altının yüksek özgül ağırlığı sayesinde gang minerallerinden kolaylıkla ayrılabilmesi nedeniyle gravite ayırması eski çağlardan beri uygulanan bir yöntemdir (Kongolo ve Mwema, 1998). Günümüzde, gelişmiş gravite ayırıcılarının madencilikte kullanılmaya başlaması ile çok daha ince boyutlu ve düşük tenörlü altın cevherlerinin gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Geleneksel gravite ayırıcılarından farklı olarak santrifüj kuvveti ile ayrım yapan gelişmiş gravite ayırıcıları, yıllar boyunca farklı özelliklerde cihazların tasarlanmasıyla çeşitlilik kazanmıştır.

Gelişmiş gravite ayırıcılarının en önemlilerinden biri Knelson santrifüj ayırıcısıdır. Patenti Byron Knelson tarafından Kanada'da 1978 yılında alınmış olan Knelson ayırıcısı, başlangıçta kesikli çalışan bir cihaz olarak tasarlanmıştır. Yıllar içinde yapılan geliştirmeler sonucunda, sürekli çalışan Knelson ayırıcıları da tasarlanarak kullanıma sunulmuştur. Karmaşık olmayan yapısı, yüksek kapasitede ve geniş tane boyut aralığında zenginleştirme

yapabilme imkanı, Knelson ayırıcısının en önemli avantajları olarak değerlendirilmektedir. Bu avantajları nedeniyle, Knelson ayırıcısı, özellikle kıymetli metallerin zenginleştirilmesinde mineral endüstrisinde yerini almıştır.

Bu çalışmada, oksitli bir altın cevherinin zenginleştirilme olanakları, Knelson ayırıcısı kullanılarak, istatistiksel deney tasarımı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Knelson ayırıcısının, G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranı gibi çalışma parametrelerinin, altının verim ve tenör değerleri üzerindeki etkileri Merkezi Kompozit Dizayn yöntemi kullanılarak optimize edilmiş ve parametrelerin tenör ve verim üzerindeki etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri istatistiksel olarak araştırılmıştır. İlave olarak, taze cevher ve tenörün öncelendiği durumda elde edilen Knelson ayırıcısı artığına Bottle Roll testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Altın insanlık tarihi boyunca var olmuş bir metaldir. İlk çağlardan itibaren kullanılan altın, bazı medeniyetler için varlık birikimi ve değiş tokuş aracı olarak kullanılırken, bazı medeniyetler içinse iktidar ve gücün bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Sümerler, Mısırlılar, Lidyalılar, Aztekler ve Asurlular gibi eski büyük medeniyetler altına büyük önem vermişlerdir. Altının madenciliğinin yaygınlaşmasının, medeniyetlerin güçlenmelerinde en önemli etkenlerden biri olduğu kabul edilmektedir.

Anadolu'nun tarihte birçok medeniyete yataklık etmesinin maden zenginliği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Altın için ilk madencilik faaliyetinin, M.Ö. 4500 yıllarında Çorum Derekutuğun'da gerçekleştiği bilinmektedir (Yalçın ve İpek, 2012). Altının süs eşyası ve takı olarak kullanıldığının en eski kanıtı olarakta Peru'da bulunan kalıntılar gösterilmektedir (Özbek, 1998). Mısırlılar, M.Ö. 3200 yıllarında altını üreterek kullanan en eski medeniyetlerden biri olarak kabul edilmektedir (Harrell ve Brown, 1992). Lidya Kralı Krezos, M.Ö. 550 tarihinde altın sikke bastırmış ve altının para olarak kullanılması ile ticaret hareket kazanmıştır. Tarihde diğer bilinen hükündarlardan, Kral Priamos, Kolhis kralı Aietese ve Frigya kralı Midas altın sikkeler kullanmışlardır. Altının devlet borçlarının ödenmesi amacıyla Roma'da kullanıldığı bilinmektedir (Erdem, 2006). Altın, Türk devletlerinde, hükümdarların kullandığı taçlar, yüzükler, kılıçlar gibi farklı objelerde güç simgesi olarak kullanılmıştır. Osmanlı'da altın, sikkeler bastırılarak, para olarak kullanılmıştır (Erdem, 2006).

Yüzyıllardan beri değişim aracı ve para olarak kullanılan altın, 20. yüzyıldan itibaren daha çok yatırım aracı olarak alınan, satılan veya saklanan bir finansal araç haline gelmiştir. Günümüzde altın finsanal değerine ilave olarak endüstriyel olarak da kritik bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Altın, saflığı, kararlı yapısı, termal ve elektriksel iletkenliği gibi özellikleri nedeniyle elektrik sistemleri, elektronik cihazlar, medikal ve cerrahi ekipmanlar, uzay ve havacılık endüstrisi gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

2.1. Altının Özellikleri

Kimyasal sembolü “Au” olan altın, Latince’de “parlayan ışıldayan” anlamına gelen “aurum” kelimesinden türetilmiştir. Periyodik cetvelde, 6. periyodun 11. grubunda yeralan, parlak sarı bir renge sahip kıymetli bir metaldir ve diğer metallerden farklı olarak yerkürede nabit olarak bulunabilmektedir (Güner, 2020). Altın, periyodik cetvelde yer aldığı gruptaki elementlerin tüm özelliklerini göstermektedir.

Altının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Marsden ve House, 2006). Altın, yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahip olmasının yanında, kimyasal olarak oldukça kararlı, oksitlenmeyen bir metaldir. Ayrıca, yumuşak bir metal olması sayesinde kolaylıkla işlenip, şekillendirilebilmektedir. Altın radyoaktivite özelliği göstermezken, radyasyonu yüksek oranda yansıtan bir yapıya sahiptir.

Çizelge 2.1. Altının Kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikler	**Değer**
Atom Ağırlığı	196,9665
Erime Noktası	1064 °C
Kaynama Noktası	2808 °C
Atom Çapı	0,1422 nm
Kristal Sistem	Yüzey-Merkezli Kübik
Yoğunluk	19,32 g/cm³
Brinell Sertliği	25 MPa
Elastiklil Katsayısı	$7{,}747 \times 10^{-12}$ MPa
Gerilme Dayanımı	123,6-137,3 MPa
Sıkıştırılabilirlik	$6{,}01 \times 10^{-12}$ l/Pa
Erime Isısı	$1{,}288 \times 10^{4}$ J/mol
Buharlaşma Isısı	$3{,}653 \times 10^{5}$ J/mol
Termal İletkenlik	311,4 W/(m·K))
Elektriksel Özdirenci	$2{,}05 \times 10^{-5}$ Ω·cm
Entropi	47,33 J/K

2.2. Altın Mineralleri

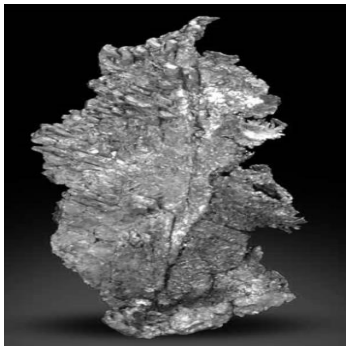
Nadir bir metal olan altın, yer kabuğunda saf olarak bulunmasının yanında farklı metallerle alaşım halinde de bulunabilmektedir. Altın mineralleri, içerdiği altın miktarına ve alaşım yaptığı minerallere göre değerlendirilmektedir.

Altın doğada genel olarak nabit halde bulunmaktadır. Altın içeriği %75'ten fazla olan altın mineralleri nabit altın olarak isimlendirilmektedir. Nabit altın, doğada genellikle %85-95 saflıkta bulunur ve safsızlık olarak gümüş içermektedir. Saf altının özgül ağırlığı 19,3 g/cm^3 iken nabit altının özgül ağırlığı içerdiği safsızlığa bağlı olarak 15-19,3 g/cm^3 arasında değişkenlik göstermektedir (Marsden ve House, 2006). Şekil 2.1'de Kaliforniya'da faaliyet gösteren Eagles Nest madeninden çıkarılan bir nabit altın tanesi gösterilmiştir



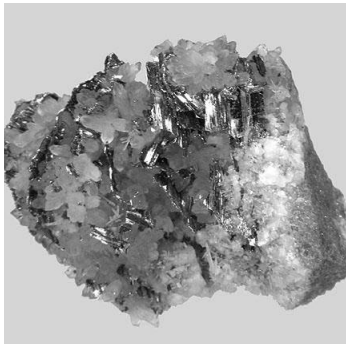
Şekil 2.1. Eagles Nest Madeninden çıkarılmış nabit altın (Kaliforniya, ABD)

Altın yaygın olarak gümüş ile alaşım halinde bulunur. Özellikle ülkemizde altın cevherleri genellikle gümüş ile birlikte alaşım halinde bulunmaktadır. Gümüş içeriği %25 ila %55 olan alaşımlar elektrum olarak isimlendirilmektedir. Elektrumun özgül ağırlığı 13-16 g/cm^3 arasında değişmektedir. (Marsden ve House, 2006). Şekil 2.2'de Nevada'daki Round Mountain altın madeninde çıkarılan bir elektrum minerali gösterilmiştir. Alaşım içerisindeki gümüş oranının %50'den fazla olduğu durumda ise mineral küstelit olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 2.2. Elektrum halinde bulunan altın (Round Mountain, ABD)

Altın gümüş dışında birçok farklı metal ile alaşım halinde bulunabilmektedir. Bu elementlerden en yaygın olanlarından biri de tellürdür (Te). Kimyasal içeriğinde Au ve Te elementi içeren tüm minerallere verilen genel bir isim olarak altın-tellürür denilmektedir. silvanit ($(Au,Ag)_2Te_4$) , kaleverit ($AuTe_2$) ve daha sıklıkla petzit (Ag_3AuTe_2) yaygın görülen altın tellürür minerallerinden bazılarıdır. Cresson Madeni'nden çıkartılan kalaverit mineraline ait bir resim Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Cresson Madeninden çıkartılan bir kaleverit minerali (Colarado, ABD)

Bu minerallere ilave olarak, auricupride (Cu_3Au), tetra-auricupridea (CuAu) gibi altın-bakır alaşımları önemli alaşımlardan bazılarıdır. Altın ayrıca, platin grubu elementler (PGM), civa, bizmut, antimon, rodyum ve uranyum gibi elementler ile birlikte de alaşım halinde bulanabilmektedir.

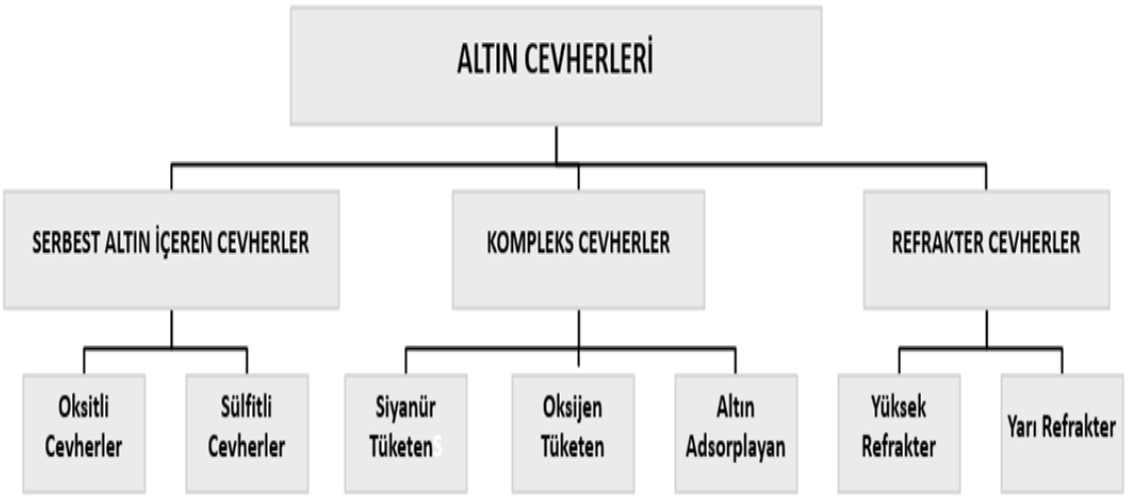
2.3. Altının Oluşumu ve Sınıflandırılması

Altının 2.5 milyar yıl öncesinde, yoğun metamorfizmanın yaşandığı Archean döneminde, volkanik faaliyetler ve hidrotermal sıvılar sayesinde yeryüzüne dağıldığı kabul edilmektedir. Ancak, uzun jeolojik zamanlar boyunca gerçekleşen yer kabuğunun tektonik

hareketleri, yer değiştirmeler, sıcaklık değişimleri ve kimyasal olaylar altının çok farklı minerolojik yapılar içinde cevherleşmesine yol açmıştır. Altın cevherlerinin farklı oluşum özellikleri nedeniyle oluşturulmuş, ortak bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Ancak, literatürde altın yataklarının çeşitli özelliklerine göre oluşturulmuş farklı sınıflandırmalar bulunmaktadır (Boyle, 1979; Poulsen vd., 2000; Rowe ve Zhou, 2007):

- Oluşum şekline göre, (epitermal, mezotermal, vb.),
- Tektonizmaya göre, (magmatik, metamorfik, sedimanter vb.),
- Yatak tipine göre, (damar, dissemine, ağ yapılı vb.),
- Özgün yapılarına göre (Carlin, Witwatersrand, Homestake vb.).

Cevher hazırlama disiplini özelinde, altın cevherlerinin sınıflandırılması altın cevherlerinin yapısal özellikleri (Şekil 2.4) ya da birlikte bulunduğu mineraller değerlendirilerek gerçekleştirilmektedir (Zhou vd., 2004; Marsden ve House, 2006).



Şekil 2.4. Yapısal açıdan altın cevherlerinin gruplandırılması

2.3.1. Plaser tipteki cevherler

Plaser tipteki yataklar, sedimanter süreçlerde bir araya gelmiş mineral tanelerinin yığılması ile oluşmaktadır. Kuzey ve Güney Amerika'daki akarsularının çakıl ve kumları arasında farkedilen altın yatakları için İspanyol madencileri bu isimlendirmeyi yapmıştır. Alüvyonal, alüvyal çökeltiler ve kolüvyal malzeme içerisinde oluşan plaserler, tipik ön

hazırlama işlemleri (kırma-öğütme) gerektirmeden, altının yüksek özgül ağırlığından faydalanılarak, kolayca zenginleştirilebilmektedir. Altın üretimindeki kolaylıkları sayesinde, plaser tipteki yatakların tarihteki ilk önemli altın kaynaklarından olduğu bilinmektedir. Tarih boyunca gerçekleştirilmiş madencilik faaliyetlerinden dolayı, günümüzde plaser tipteki yatakların altın üretimi içindeki payı, önemli ölçüde azalarak %2 civarına gerilemiştir (Marsden ve House, 2006).

Plaser altın cevherleri karmaşık bir zenginleştirme sistemine ihtiyaç duymadan gravite yöntemleri ile kolaylıkla zenginleştirilebilirken, alüvyon tipi cevherlerde kömür-yağ aglomerasyonu yöntemi de uygulanabilmektedir (Brooy, 1994). Bu tip cevherlerin hidrometalürjik süreçler ile zenginleştirilmesinde, %100'e varan altın verimleri elde edilebilmektedir.

2.3.2. Serbest altın içeren altın cevherleri

Altın minerallerinin genellikle nabit altın halinde, serbest ya da kolaylıkla serbestleşebilir durumda bulunduğu cevherler, serbest altın cevherleri olarak tanımlanmaktadır. Refrakter özellik göstermeyen ve kolaylıkla zenginleştirilebilen bu cevherler, genel olarak gravite yöntemleri ile üretilebilmektedirler. Bu cevherlerin yüksek verimler ile zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın iki ekipman, Falcon ve Knelson ayırıcılarıdır (Brooy, 1994). Serbest altın içeren altın cevherleri liç yöntemi ile %90 ve üzerindeki verimlerde zenginleştirilebilmektedir.

2.3.3. Oksitli altın cevherleri

Bu tür altın cevherleri, normal oluşumlarında sülfürlü yapıya sahip cevherlerin zaman içerisinde altere olarak oksitlenmesiyle meydana gelmektedir. Cevherin oksitlenmesi genellikle zaman içerisinde kendiliğinden hava ile etkileşime girmesi sonucunda meydana gelmektedir (Marsden ve House, 2006). Oksitlenme ve hidrotermal tepkimeler, cevherin kendi oluşumundaki yapıyı değiştirerek genellikle daha poroziteli bir yapı meydana getirmektedir. Bu da cevherin herhangi bir ek işlem gerektirmeden yığın liç metodu ile üretilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu tip cevherleşmelerde, kristalleşmiş ya da amorf bir yapı söz konusu olduğu için olumsuzluk meydana getirebilecek içerikler kil mineralleri, sülfürlü yapılar ve gang minerallerdir. Bu içeriklerin zenginleştirme süreçlerinde yaratacağı olumsuzluklar çoğunlukla yüksek çözünme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Gang minerallerinin çözünebilirliği öğütme süreçleri sırasında ya da siyanürleme aşamalarında, yüksek tüketimlere ve altın kayıplarına neden olabilmektedir. Yüksek siyanür tüketimine neden olan bir diğer konu ise gang minerallerinin gözenekli yapısından kaynaklı olarak artan yüzey alanıdır (Wolfgang, 1988).

Kil mineralleri, oksitli altın cevherlerinin zenginleştirilmesi süreçlerinde sorun yaratan önemli gang yapılarından biridir. Pirofillit ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$), talk ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), kaolinit ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$) ve montmorillonit ($Al_4Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$) gibi kil mineralleri, altın cevherlerinde en sık rastlanan kil minerallerinden bazıları olarak sayılabilir. Bu minerallerin altın zenginleştirmesinde ortaya çıkardığı sorunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- Yığın liçi metoduyla yapılan üretimlerde liç solüsyonu geçirgenliğinde azalmalar,
- İnce taneli kil minerallerinin pülp akışkanlığını azaltması,
- Altını adsorblayan karbon yüzeylerinin kil mineralleriyle dolarak adsorpsiyonu engellemesi.

Oksitli cevherlerin zenginleştirilmesinde sorun oluşturabilecek diğer önemli yapılar ise karbonatlı bileşiklerdir. Karbonatlı bileşiklerin başlıcaları kalsit ($CaCO_3$), dolomit ($CaMg(CO)_3)_2$ ve siderit ($FeCO_3$) olarak sıralanabilir. Karbonatlı mineraller altın kazanım süreçlerinde özellikle pH kontrolü ile ilgili olumsuzluklar meydana getirmektedir (Marsden ve House, 2006).

2.3.4. Altın-tellür cevherleri

Altın-tellürler altın-gümüş alaşımları dışında ekonomik öneme sahip olan ve zenginleştirilebilen önemli altın mineralleri arasındadır. Altın-tellür mineralleri arasında sık rastlananlar, kalaverit ($AuTe_2$), petzit ($Au.AgTe_2$), hessit ($AgTe_2$) ve krennerit (Au_3AgTe_8) mineralleridir. Bu minerallerde %12-44 oranlarında değişen altın ve gümüş içeriklerine

rastlanabilmektedir. Tellür içeren altın cevherlerinde siyanür liçi verimleri düşük olup, bu tip cevherlerde çözünme süreleri oldukça uzundur. Bu nedenle, altın-tellür cevherlerinin zenginleştirilmesi genellikle oksitleyici bir ön işlem ve iyi bir süreç kontrolü gerektirmektedir (Marsden ve House, 2006). Altın-tellür cevherlerinin zenginleştirilmesinde flotasyon yöntemi de uygulanabilmektedir.

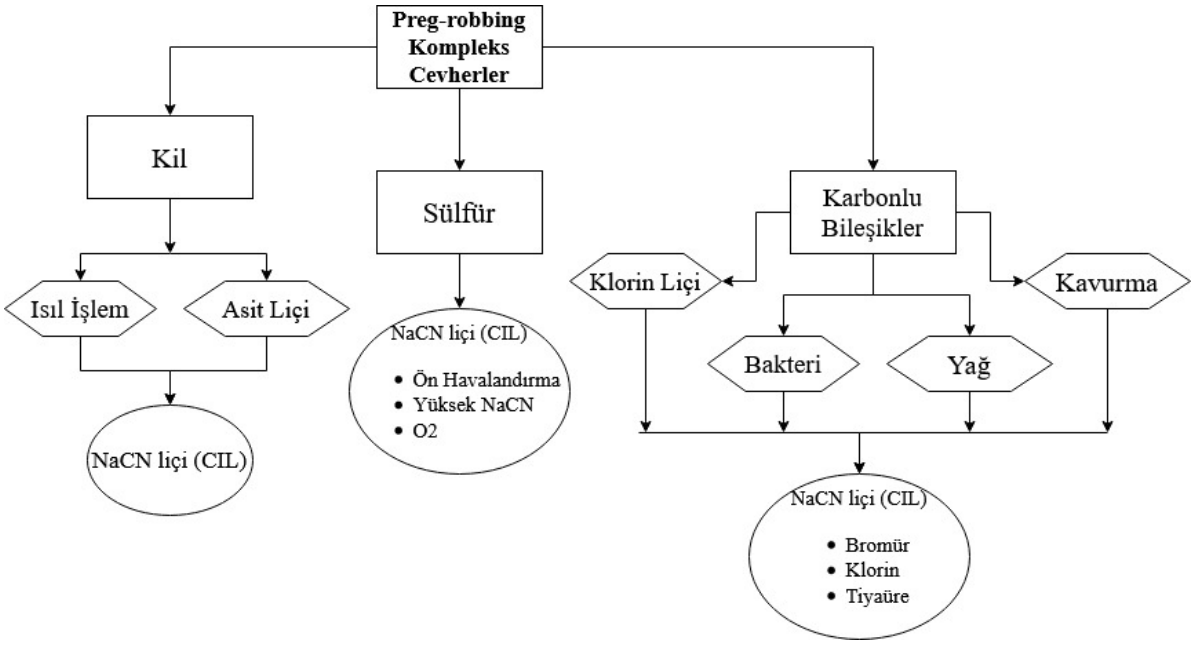
2.3.5. Karbon kökenli altın cevherleri

Karbon kökenli altın cevherleri bünyesinde yüksek oranda karbon içeriği bulunduran ve liç işlemlerinde çözünmüş halde altını bünyesine adsorbe etme özelliğine sahip altın cevherleridir. Tipik altın liç işleminde siyanür vasıtasıyla çözeltiye geçen altın iyonlarının, karbon içerikleri tarafından tekrar emilerek katı faza geçmesine "preg-robbing" adı verilmektedir (Afenya, 1991). Preg-robbing özelliği nedeniyle altın veriminin %90'dan daha düşük olduğu cevherler, refrakter altın cevherleri olarak değerlendirilmektedir.

Karbonlu yapılar, aktif elementel karbon ve de uzun hidrokarbon zincirli organik yapılarla hümik asit benzeri organik asitlerden meydana gelmektedir ve bu yapılar genellikle sülfürlü ve silika içeriği yüksek cevherlerde görülmektedir (Afenya, 1991). Karbonlu yapıların haricinde killer de benzer nedenler ile altın kazanımına engel olabilmekte, bu cevherlerde çözeltiye alınan $Au(CN)_2$ kompleksleri zaman zaman kil yapıları tarafından da adsorbe edilmektedir (Baum, 1990).

Aurosiyanür ($Au(CN)_2$) ile karbonlu yapılar arasında meydana gelen etkileşim tam olarak açıklanabilmiş değildir. Bu etkileşimi açıklamak için yapılan bazı çalışmalarda yüzey aktif karbonun nötral halde bulunan Mn^+ $Au(CN)_2$ bileşikleri ile elektrostatik bir etkileşimi önerilmiştir (Afenya, 1991; Cho ve Pitt, 1979; Gross ve Scott, 1927). Ancak aurosiyanür aktif karbon ile etkileşime girerken metalik altının oluşmadığı da pek çok bilim insanı tarafından kabul edilmektedir (Afenya, 1991). Asare (1984), organik bileşiklerin, karbonlu maddenin yüzeyinden benzen kullanılarak temizlenmesi ile bu organik bileşiğin absorpsiyon kapasitesinin azaldığını ancak, bu durumda da organik bileşiklerin aktif karbon gibi davranma olasılığının bulunduğunu ifade etmiştir.

Dunne vd., (2012) preg-robbing özelliği gösteren altın cevherlerinin 500 ppm'e kadar altın adsorblama kapasitesine sahip olduğunu ifade etmektedir. Preg-robbing, karbon içerikli cevherlerin yanı sıra sülfürlü cevherlerin düşük siyanür derişimlerindeki liç işlemlerinde de meydana gelebilmektedir (Dorr ve Bosqui, 1950) Fakat bu durum siyanür ve oksijen derişiminin arttırılmasıyla çözülebilmektedir. Preg-robbing özelliği gösteren cevherler için önerilen işlemler Şekil 2.5'de verilmiştir (Brooy vd., 1994).



Şekil 2.5. Çözünmüş altını adsorplayan cevherlere uygulanan işlemler

2.3.6. Sülfürlü altın cevherleri

Sülfürlü altın cevherleri günümüzde altın üretiminin başlıca kaynaklarından biridir. Altın, sülfür mineralleri içerisinde nabit altın ve/veya farklı altın mineralleri olarak değişik mineraller halinde bulunabilmektedir. Doğada en yaygın bulunan sülfür minerali olan pirit (FeS_2) sülfürlü altın cevherlerinde de en yaygın olarak gözlenen sülfür mineralidir. Sülfürlü cevher yatakları arsenopit (FeAsS) gibi demir sülfür mineralleri ile kalkopirit (CuFeS2), galen (PbS), sfalerit (ZnS) gibi baz metal sülfür mineralleri içerirler.

Altının kolaylıkla serbestleşebilir durumda bulunduğu sülfürlü cevherlerde, zenginleştirme süreçleri gravite ayırması, flotasyon ve siyanür liçi gibi yöntemlerle kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Ancak altının düşük verimle zenginleştirilebildiği

cevherler, “refrakter altın cevherleri” olarak tanımlanmaktadır. Refrakterliğe göre altın cevherlerinin sınıflandırılması Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Refrakter altının sınıflandırılması

Tür	Koşul
Yüksek Refrakter	Verim <%50
Orta Refrakter	%50 < Verim < %80
Az Refrakter	%80 < Verim < %90
Refrakter Olmayan	Verim > %90

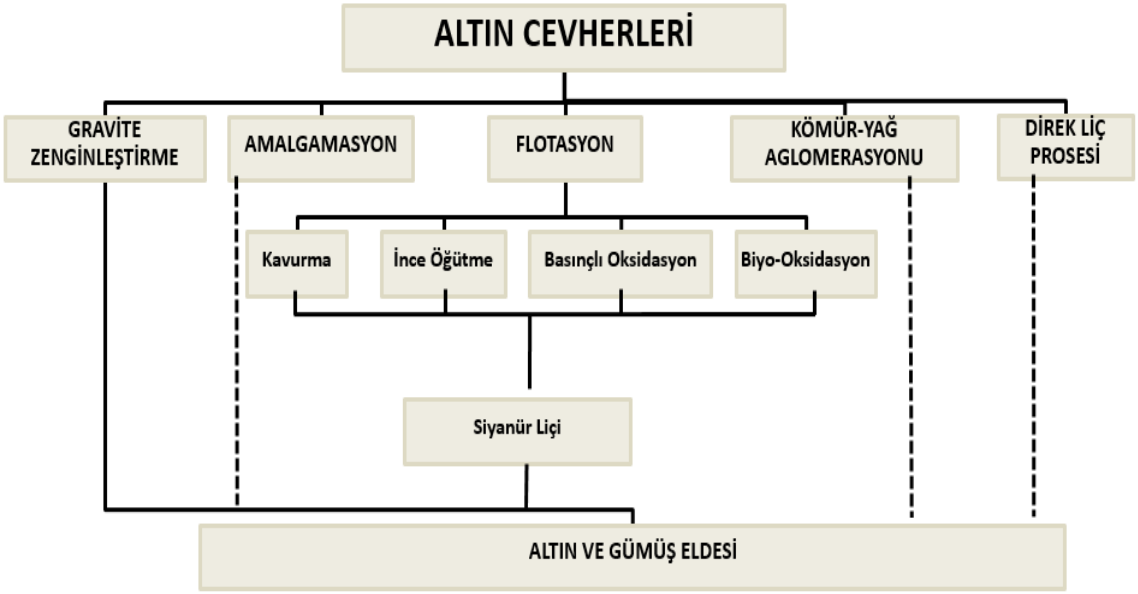
Yüksek refrakter özellik gösteren altın cevherlerinde altın, sülfür mineralleri gibi yapıların içinde kapanım halinde bulunarak altının çözülmesinde rol oynayan kimyasallar ile temas edememektedir. Refrakter altın cevherlerinin tanımlanması aşağıdaki koşullara göre gerçekleştirilmektedir (Afenya 1991; Brooy vd., 1994; Chen vd. 2002; Komnitsas ve Pooley, 1989):

- Altın tanelerinin fiziksel olarak kapanım halinde sülfürlü, oksitli mineraller ve silikatlı yapıların içerisinde bulunması.
- Altının alaşım halinde kimyasal olarak kapanım halinde bulunması.
- Altın tanelerinin sub-mikroskobik boyutlarda “görünmez altın” veya “katı solüsyon” halde sülfürlü yapılarda (çoğunlukla arsenopirit) bulunması.
- Yüksek miktarda siyanür tüketen bazı yapıların cevher içerisinde yer alması.
- Yüksek miktarda oksijen tüketen bazı yapıların cevher içerisinde yer alması.
- Altının aktif karbonlu yapıların içerisinde bulunması.
- Altın taneleri üzerinde pasif katmanların bulunması.

Cevherlerin refrakter olarak tanımlanmasına neden olan en önemli neden serbestleşmedir. İnce boyuttaki altın tanelerinin sülfür mineralleri ve gang içerisinde fiziksel kapanım halinde olması durumunda bu durum aşırı öğütme ile aşılabilmektedir. Ancak, altının cevher içinde kimyasal olarak kapanım halinde, “görünmez altın” veya “katı solüsyon” olarak bulunduğu durumlarda oksidasyon işlemleri uygulanmaktadır (Afenya 1991; Brooy vd., 1994; Chen vd., 2002; Komnitsas ve Pooley, 1989). Bu tipteki altın cevherlerinde altın taneleri, optik ve elektron mikroskopları ile tespit edilememekte, genelde pirit ve arsenopirit gibi süflür mineralleri içerisinde bulunmaktadır (Chen vd., 2002).

2.4. Altın Zenginleştirme Yöntemleri

Altının zenginleştirilmesi için uygulanan birçok ön işlem, yan işlem ve ana üretim yöntemi bulunmaktadır. Altın ve gümüşün üretim metodu belirlenirken dikkat edilmesi gereken başlıca özellikler cevherin mineralojisi, tenörü ve rezervidir. Örneğin, serbest haldeki nabit altın içeren cevherlerin zenginleştirilmesinde gravite ayırması uygulanabilirken, karmaşık yapıdaki cevherlerin zenginleştirilmesinde siyanür liçi ve flotasyon yöntemleri tercih edilmektedir. Yine cevher yapısına bağlı olarak bu yöntemlerin birbirine tamamlayıcı olarak bir arada kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur. Altın zenginleştirme yöntemleri kısaca Şekil 2.7'da verilmiştir.

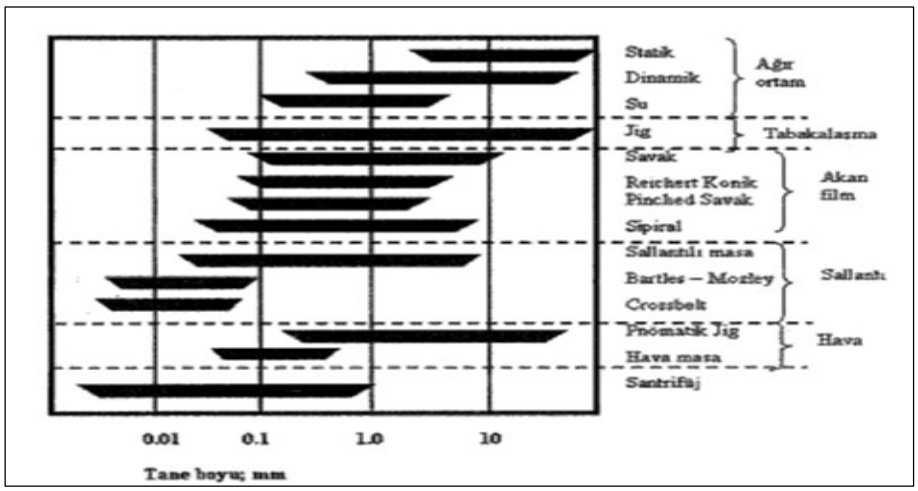


Şekil 2.6. Altın zenginleştirme yöntemleri

2.4.1. Gravite ayırması

Gravite ayırması, cevher bileşenlerinin özgül ağırlık farkına bağlı olarak ayrılmasına dayanmaktadır Bu yöntemde zenginleştirme, yoğunlukları farklı olan malzemelerden ağır olanın batma eğilimi göstermesi, hafif olan malzemenin ise askıda kalarak ya da pülpün akış hareketi yönünde ilerleyerek ayrılması ile gerçekleştirilmektedir. Gravite esaslı zenginleştirme işlemlerinde en yaygın ekipmanlar savaklar, düz ya da çıtalı masalar, silindirik Johnson seperatörü, Reichert konileri, sallantılı masalar ve jiglerdir. Tüm bu

ekipmanlarda ana mantık bir akışkan ortamda gang ve değerli minerallerin birbirinden fiziki olarak ayrılması temeline dayanmaktadır. Cevher tane boyuna göre uygulanabilen gravite yöntemlerini gösteren diyagram Şekil 2.8'da verilmiştir.



Şekil 2.7. Tane boyutuna bağlı olarak uygulanan gravite yöntemleri (Çilingir, 1996)

Altının özgül ağırlığının gang minarelerine göre yüksek oluşu gravite yöntemlerinin kullanılmasını cazip hale getirmektedir. (Kongold ve Mwema, 1998). Gravite ayırması yaygın olarak altının nabit halde bulunduğu, iri boyutta serbestleşebilen altın cevherlerinde uygulanmaktadır. Plaser tipteki yataklar bu nedenle gravite yöntemi ile zenginleştirmeye en uygun yataklar olarak değerlendirilmektedir (Laplante vd., 1995). Serbestleşen altının hemen devreden alınmasında yarar vardır. Gravite ayırmasının ön zenginleştirme işlemi olarak kullanımı su tüketiminde de avantajlar sağlamaktadır (Adams, 2005).

Gravite ayırması, altının zenginleştirilmesinde diğer yöntemlerin öncesinde ya da sonrasında da yaygın olarak tercih edilebilmektedir. İri altın tanelerinin siyanür çözeltilerinde tamamen çözünmesi uzun süreler gerektirdiğinden, gravite ayırması ile büyük tanelerin önceden ayrılması liç işlemlerinin süresini kısaltmaktadır. Ayrıca, çözeltiye alınması gereken altın miktarı azalacağından liç işlemlerinde harcanacak reaktif miktarının ve çözeltiden altın kazanılmasından kullanılan aktif karbon miktarının da azalması sağlanmaktadır. Ayrıca altın tanelerinin yüzeylerinin siyanürle çözünmeyi engelleyecek düzeyde özellikle demir oksit ya da organik bileşiklerle kaplanmış olduğu durumlarda, gravite ayırması tercih edilmektedir. Bu tip altın cevherlerinde altın yüzeylerinin ek bir işlemle temizlenmesi gerekmektedir. Gravite ayırması ile alınan konsantre miktarı toplam

cevher kütlesinin küçük bir bölümü olacağından bu tür ikincil işlemlerin uygulanması ekonomik açıdan bir sorun teşkil etmemektedir (Celep, 2005). Kapalı öğütme devrelerinde, devreden yükün gravite ayırmasına tabi tutulması ile elde edilen konsantrelerin doğrudan izabe edilmesi ya da yoğun liç uygulaması ile zenginleştirilmesi de mümkündür (Vincent, 1997).

Cevher zenginleştirme yöntemlerinin büyük bir kısmı için tane boyutunu küçültmek yani serbestleşmeyi sağlamak önemli gerekliliklerden biridir. İnce tane boyutundaki değerli minerallerin gravite yöntemi ile zenginleştirilmesi bazı zorluklar içermektedir. Jig, spiral ya da oluk gibi gravite zenginleştirme yöntemlerinin aktif olarak uygulanabilmesi için çoğunlukla cevherin 100 μm ve daha büyük tane boyutlarında bulunması gerekmektedir. Bu detay daha gelişmiş gravite ayırıcılarının geliştirilmesi arayışını doğurmuştur. Bu amaçla geliştirilen Knelson ve Falcon ayırıcıları gibi santrifüj kuvveti ile ayrım yapan cihazlar görece yeni teknolojili gravite ayırıcılar arasında yerlerini almışlardır. Bu cihazlar sayesinde 30 μm'dan daha küçük tane boyutlarında bulunan çok ince tanelerin zenginleştirilmesi gerçekleştirilebilmektedir (Xiao, 1998; Huang, 1996; Knelson ve Jones, 1993; Ling, 1994; Ren vd., 1994; Laplante vd., 1995).

Santrifüj prensibine sahip gravite ayıcıları ile daha ince taneli, özgül ağırlığı yüksek cevherlerin zenginleştirilmesinde oldukça yüksek verimler elde edilmiştir. Santrifüj ile zenginleştirme yapan gravite ayırıcıların başlıca avantajları aşağıda maddeler halinde aşağıda verilmiştir. (Parekh vd., 2002):

- Metal verimlerinde ve ekonomik kazançta artış,
- İlk yatırım ve işletme maliyetinde azalma,
- Masa gibi geleneksel yöntemlerle kazanılamayan malzemelerin zenginleştirilmesi,
- Flotasyona ya da liç devrelerine giden malzeme miktarının azaltılması,
- İşlenen liç çözeltisi miktarının ve katı atık miktarının azaltılması,
- Toplam tesis kapasitesinin arttırılması,
- Yüksek tenörlü konsantre eldesi,
- Basit, ucuz ve pratik bir işlem olması,
- Çok ince tanelerin zenginleştirilmesine olanak tanıması,
- Su tüketim miktarlarının azaltılması.

Santrifüj etkisiyle ayrım yapan cihazlardan en önemlileri Multi- Gravite Ayırıcısı (MGS), Kelsey Jigi, Falcon ayırıcısı ve Knelson ayırıcısı olarak sıralanabilir.

Multi-Gravite Ayırıcısı (MGS): İnce ve çok ince boyutlu minerallerin ayrılması amacıyla Richard Mozley tarafından üretilmiştir. MGS, sallantılı masalarda uygulanan frekanslı titreşim kuvvetlerinin santrifüj etkisi ile birleştirilmesiyle tasarlanmış bir zenginleştirme ekipmanıdır.

MGS, dönen bir tambur içerisinde ileri geri hareket eden bir mekanizmadan oluşmaktadır. Tambur içerisine kesintisiz bir şekilde beslenen pülpün zenginleştirilmesi için, tambur 3-5°'lik bir açı yapacak şekilde ayarlanabilmektedir. Tamburdaki dairesel hareket sayesinde oluşan santrifüj kuvveti ile taneler pülp içinde engelli çöküş eylemi göstermektedir. Ağır olan mineraller akışkan içerisinde zemine doğru çökerek tambur yüzeyinde takılı kalmakta ve santrifüj etkisi ile su oranı daha düşük bir pülp tabaka meydana getirmektedir. Ağır malzemenin çökme eylemi ile oluşan konsantre malzeme MGS içindeki küreyiciler yardımıyla tamburun ön kısmına doğru taşınmaktadır. Besleme yönünde taşınan konsantre, tamburun ön tarafından yer alan bir açıklıktan tamburu terk etmektedir. Sisteme beslenen malzeme içerisindeki özgül ağırlıkça hafif malzeme ise cihazın eğimi ve yıkama suyunun debisi ile beslemenin aksi yönünde sistemden uzaklaştırılmaktadır. MGS'nin ayırma etkinliğinde yıkama suyu etkin rol oynamaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Kelsey Jigi: Kelsey jigi ana amaç olarak ince yapılı pirit tanelerinin kömür içeriğinden temizlenmesi amacı ile orta çıkmıştır. Kelsey jigi sahil kumları, demir, kalay, altın, kurşun, manganez ve platin cevherlerinin zenginleştirilmesinde yüksek verimlilikler sağlamıştır. Metal içerikli cevherlerin üretiminde ve endüstriyel üretim sonrası atıklarında metal geri kazanımı konularında oldukça başarılı çalışmalar yürütülmüştür. Endüstriyel çapta en yaygın kullanımı, spiral ve sallantılı masa süreçlerinde ince tane boyutundaki (~10 μm) Renison kalaylarından kassiteritin verimli bir şekilde zenginleştirilmesidir. Zirkonyum ve kyanit minerallerinin deniz kumu içerisinden kazanılması uygulamalarında sıkça kullanılmıştır (Majumder ve Barnwal, 2006).

Kelsey jigi, jig içerisinde dönen bir kap çevresine dolanmış bir kaç tekneden oluşmaktadır. Tekne haznesinin içinde suni bir yatak oluşturmak amacıyla üçgen bir elek

bulunmaktadır. Her teknede bulunan mekanik pulsatörler, yatakta farklı öz kütleli malzemelerin ayrıştırılması için pülsasyonlar sağlamaktadır. Darbeyi üreten diyafram, pülsasyonu veren ana şaft mekanizmasından ayrı olarak montajlanmıştır ve diyaframa eksantrik motor ile güç verilmektedir. Zenginleştirme sırasında ağır ve hafif öz kütleli cevherler arasındaki bir öz kütleli bir suni yatak malzemesi eleğe konulmuştur. Besleme, jige merkezi besleme borusunun, üst kısımdan girer ve haznenin dönüşü ile oluşan maksimum 60 G'lik santrifüj kuvveti ile pülp suni yatakla temas eder. Darbe kollarının yüksek frekanslı ve sıralı basması, klasik jiglerdeki gibi suni yatak boyunca basma hareketi yaratarak suni yatağın genişleyip daralmasını sağlar. Bu, malzemenin sırası ile beslemenin ve suni yatak mineralinin yoğunluklarına göre ivmelenmelerine neden olmaktadır. Yüksek özgül ağırlıklı taneler suni yatak içerisinden geçerek konsantre bölmesine boşalırken, düşük özgül ağırlıklı taneler suni yatağın üzerinden kayararak, cihazın üst kısmından taşma yoluyla sistemden uzaklaştırılmaktadır (Kökkılıç, 2011; Yerriswamy vd., 2003).

Falcon Ayırıcısı: Falcon ayırıcısı tek duvarlı diye tabir edilen ayırıcılarla geri basınç sistemini bir araya getirerek oluşan zenginleştirme prensibine sahiptir. Altın madenciliğinde cevher içerisinde serbest halde bulunan ve plaser tipteki altını liç işlemi öncesinde kazanarak ve liç işlemindeki yükü azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar kullanılarak liç sonrası atıkta bulunan altının kazanımı, gümüş ve platin grubu minerallerin (PGM) zenginleştirilmesi ya da cüruf malzemesinin geri kazanımı gibi alanlarda kullanılmış olsa da ana görevleri plaser tip yataklardaki ve serbest taneli altın cevherini kazanmak amacıyla kullanılmaktadır (Kökkılıç, 2011).

Falcon ayıcısı, birbirinden büyük oranda özgül ağırlık farkı bulunan malzemelerin santrifüj yardımıyla hafif olanın savrularak atığa ayrılması, ağır malzemenin ise çökerek ayırıcı içinde tutulması prensibiyle çalışmaktadır. Ayrımı yapılmak istenilen malzeme belli katı oranlarıyla pülp formunda hızlıca dönen ayırıcı hücresinin merkezinden cihaza verilmektedir. Cihazın merkezindeki ayırıcı hücresinin merkezindeki pülp malzeme su ile ayrılarak santrifüj etkisiyle özgül ağırlığı hafif olan malzeme savrularak rotorun dışına atılmaktadır. Konsantre hücresinde toplanan ağır malzeme manuel ya da otomatik olarak belirli aralıklarla kazanılmakta, özgül ağırlıkça küçük olan malzeme atık hattı üzerinden sistemde çıkış yapmaktadır. En fazla 300 G hızına kadar ulaşan rotor dönüş hızıyla Falcon ayırıcısı, oldukça basit bir yapıya sahip ve bakımı kolay bir cihazdır (Öney, 2012).

Knelson Ayırıcısı: Knelson ayırıcısı özellikle ince ve çok ince taneli minerallerin özgül ağırlık farkına göre ayrımını gerçekleştirmek için tasarlanmış basit bir cihazdır. Ayırıcı bir elektrik motoru yardımıyla yüksek hızla döndürülen, oluklu yapıdaki konik bir hazneden oluşmaktadır. Hazneye katı-sıvı süspansiyonu olarak beslenen cevher malzemesinde, ağır taneler hazne içindeki oluklara takılırken, oluklardan beslenen su sayesinde hafif malzemeler hazne üstünden cihazdan uzaklaştırılmaktadır.

Knelson ayırıcısı bu çalışmanın konusunu oluşturduğundan, ilerleyen bölümlerde detaylı olarak ele alınacaktır.

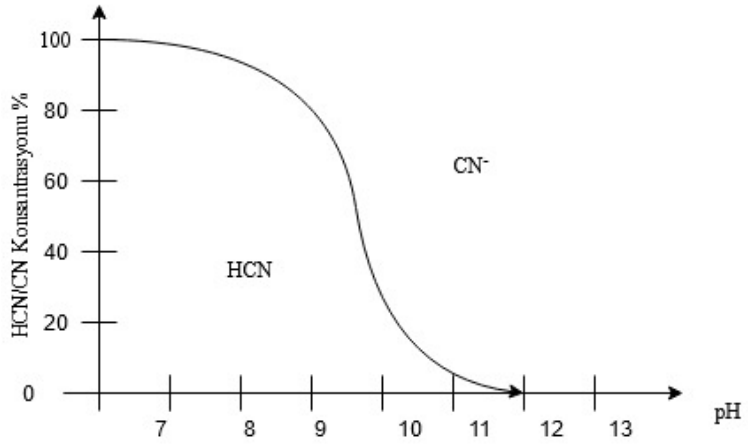
2.4.2. Hidrometalürjik (liç) yöntemler

Hidrometalürjik yöntemler (liç), basit olarak değerli mineral veya metalin, çeşitli kimyasal reaktifler yardımı ile tepkimeye sokularak, sıvı faza geçirilerek çözünmesi, sonrasında ise çözünmüş haldeki malzemenin çeşitli yöntemler yardımıyla çözeltiden ayrıştırılarak üretilmesi temeline dayanmaktadır.

Altının siyanürle çözüdündürülmesi sonucunda ilk yüklü solüsyon eldesi 1840 yılında Elkington tarafından gerçekleştirilmiştir. Böylelikle altının siyanür ile kullanımı ilk kez gerçekleşmiştir. Ancak, Elkington'un çalışması altının zenginleştirilmesinden çok, farklı malzeme yüzeylerinin elektroliz ile altın kaplanmasında kullanmıştır (Fleming, 1992). Tüvenan cevherden altın kazanımı amacıyla siyanürün ilk kullanımı ise 1884 yılında John Steward MacArthur tarafından, Birleşik Krallık'ta "Process of Obtaining Gold and Silver" başlığı altında alınan patentlenen çalışmayla gerçekleştirilmiştir. (Habashi, 1987). MacAurthur'un çalışmasından daha önce, Elsner'in 1846'da Almanya'da, Faraday'ın 1857'de Birleşik Krallık'ta, Bargaton'un 1884 yılında Rusya'da çalışmalar gerçkeleştirdiği bilinmektedir (Habashi ve Celep, 2013). Endüstriyel ölçekte siyanür ile altın kazanımı ise ilk kez 1889'da Yeni Zelanda'da ve 1890'da Güney Afrika'da uygulanmıştır (Habashi, 1987). Altın kazanım yöntemlerinde hidrometalürjik uygulamalar 19. yy sonlarına doğru yaygınlaşmıştır.

Altının liç yöntemi ile zenginleştirilmesinde, altının çeşitli reaktiflerle teması sonrası sıvı faza geçirilmesi amaçlanmaktadır. Reaktif olarak genellikle siyanürlü bileşikler (NaCN,

KCN, $Ca(CN)_2$) kullanılmakta olup, en yaygın reaktif ise sodyum siyanürdür (NaCN). Alkali siyanür çözeltisi altını çözerken oluşan anodik reaksiyon ve aynı tepkimenin devamlılığı için ortamda bulunan oksijen katodik redüksiyon yapmakta ve böylelikle $Au(CN)_2$- bileşiği meydana gelmektedir (Yüce, 2014). Liç işlemi sırasında ölümcül bir gaz olan HCN gazının emülsiyonunu engellemek ve $Au(CN)^{-2}$ bileşiğinin oluşmasını önlemek için, liç işlemlerinde ortam pH'ı 9,5-12 seviyeleri arasında olması gerekmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.8. HCN ve CN^- nin pH'a bağlı meydana gelme grafiği

Altın ve gümüşün siyanür ile tepkimeye girerek çözelti oluşmasıyla ilgili birçok teori ortaya konmuştur. Bu teorilerin başlıcaları oksijen teorisi, hidrojen teorisi, hidrojen peroksit teorisi ve siyanojen teorisi olarak bilinmektedir (Dorr ve Bosqui, 1950; Marsden ve House, 2006; Yannopoulos, 1991; Yüce, 2014). Siyanür ile altın ve gümüş eldesinde oluşan tepkimeler Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2'de gösterilmiştir (Zhang vd., 1997).

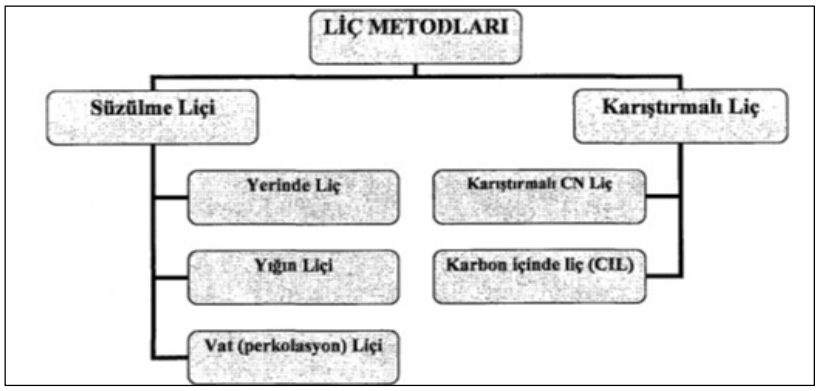
$$4Au + 8CN^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Au(CN)_2^- + 4OH^- \quad (2.1)$$

$$4Ag + 8CN^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Ag(CN)_2^- + 4OH^- \quad (2.2)$$

Sonuç olarak altının siyanürizasyonu;

- Oksijenin emilimi,
- Çözeltideki oksijenin ve siyanürün tüm yüzeyler ile etkileşimi,
- Siyanür ile çözünmüş oksijenin katı oluşumlar tarafından emilimi,
- Egzotermik reaksiyon oluşumu,
- Oluşan altın-siyanür molekülünün katı taneden ayrılması,
- Desorbe olmuş malzemenin sıvıya geçişi, sıralaması ile gerçekleşmektedir.

Liç etkinliğinde aktif rol oynayan birçok parametre vardır bunlar, siyanür ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu, sıcaklık, pH, yüzey alanı ve diğer metallerin yapıdaki içeriğidir. Cevherin mineralojisine ve altın tenörüne bağlı olarak farklı tipte liç işlemleri uygulanmaktadır. Örneğin düşük tenörlü bir oksitli altın cevherinin üretim yöntemi olarak yığın iç metodu uygun olacakken, oksitli yüksek tenörlü bir altın cevherinin üretimi tank liçi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Minerolojik açıdan ise sülfür içeriğinden kaynaklı düşük çözürünürlüğün söz konusu olduğu durumlarda oksitleyici yöntemleri ya da fiziksel yöntemleri içeren ön işlemler uygulanabilmektedir. Çilingir (1996) liç yöntemi seçimi için altın cevherlerinin sınıflandırılmasını "düşük tenörlü altın cevherleri", "direkt liç edilebilen altın cevherleri" ve "yüksek tenörlü altın cevherleri" olarak üç başlıkta değerlendirmiştir. Gupta ve Mukherjee (2000) ise liç yöntemlerini "süzülme liçi" ve "karıştırmalı liç" ana başlıkları altında "yerinde liç", "yığın liçi", "vat liçi", "karıştırmalı siyanür liçi" ve karbon içinde liç (CIL)" olacak şekilde sınıflandırmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Liç yöntemleri

Günümüzde siyanür altın madenciliğinde yaygın olarak kullanmakta ve siyanür liçinde yüksek kazanım oranları elde edilmektedir. Ancak, siyanürün toksik yapısının çevresel sorunlar oluşturduğu da bilinmektedir. Bu nedenle siyanüre alternatif olabilecek yüksek verimliliğe sahip ve toksik etkileri olmayan kimyasallar ile değerli metal üretim metotları da önem kazanmıştır. Bu amaçla siyanürün yerine kullanılabilecek alternatif reaktifler tiyoüre ($CS(NH_2)_2$), tiyosülfat (S_20_3), tiyosiyanat (SCN), sülfit (Na_2S, $(NH_4)_2S$, NaHS), amonyak (NH_3) ve halojenler olarak sıralanabilir (Hilson ve Monhemius, 2005).

Hilson ve Monhemius'e (2005) göre alternatif reaktiflerde aranan özellikler ise şunlardır:

- Çevresel problem yaratmaması ya da az toksik olması,
- İlk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması,
- Etkin liç verimi ve ekonomikliği,
- Elde edilebilirlik ve uygunluk,
- Bozundurulma / yeniden kazanılabilirlik özelliğine sahip olma,
- Tesis ölçekte uygulanabilirlik.

2.4.3. Flotasyon

Flotasyon, altının zenginleştirilmesinde genellikle serbest haldeki, ince taneli altının ya da bünyesinde sülfür veya tellür içeren altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde tercih edilmektedir (Bulatovic, 1997). Flotasyon, cevher içerisindeki değerli malzemenin yüzdürülerek konsantre edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede toplam cevher kütlesi azaltılırken, sürecin devamında elde edilen konsantrenin liç ile zenginleştirilmesi gerekmektedir.

Altın flotasyonunda uygulanacak koşulların belirlenmesi, cevherin mineralojik özelliklerine göre gerçekleştirilmektedir. Ancak flotasyonda kullanılan reaktifler siyanürleme süreçlerinde olumsuzluklar ortaya çıkarabilmektedir. Bunun nedeni, flotasyon süreçlerinde cevher yüzeyde oluşan reaktif kaplamalarıdır. Bu reaktifler siyanür ile cevherin etkileşimini azaltarak cevherin liç ile zenginleştirilmesini olumsuz etkilemektedir (Çilingir, 1996). Dolayısıyla altın flotasyonunda uygulanacak koşullar belirlenirken cevher yapısının yanında, sonraki süreçlerin de bütüncül olarak ele alınması gerekmektedir.

Altın tane boyutu, şekli, cevher içerisinde bulunan gang mineralleri, öğütme şartları, pülp kimyası gibi birçok parametre altın flotasyonunu önemli olarak etkilemektedir. Örneğin, cevher yapısı içerisinde bulunan nabit altın ve elektrum öğütme işlemi sırasında yassı bir şekil kazanacağı için flotasyon aşamasında altın tanelerinin hava kabarcıklara tutunması nispeten daha zor olmaktadır (Celep, 2005). Öğütme işleminde tane yüzeylerinin öğütücü ortamdan kaynaklanan demir bileşikleri gibi yüzey kaplamaları ile kaplanması altın flotasyonunu olumsuz etkileyen önemli nedenlerden bir diğeridir. Birçok cevher yatağında, altın kalkopirit, sfalerit, galenit gibi baz metal sülfürler ile birlikte bulunabilmektedir, Doğru reaktif uygulamaları ve uygun devre tasarımları ile altın bu cevherlerden seçimli olarak

zenginleştirilebilmektedir. Cevher içerisinde bulunan pirit gibi minerallerin iyi tasarlanmış bir temizleme devresiyle seçimli olarak uzaklaştırılması mümkündür (Oluklulu, 2020). Altın yapısı içerisinde bulunan tellür mineralleri flotasyon için büyük bir sorun oluşturmamaktadır.

Altın tanelerinin çok ince boyutlarda ve sülfürlü yapılar içerisinde kapanım halinde bulunduğu refrakter yapıdaki cevherlerde, flotasyon ile elde edilen konsantrenin biyooksidasyon, kavurma, POX vb gibi işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu yöntemlerle sülfürlü yapıların bozularak, cevherlerin oksidasyonu ile altının serbest hale getirilmesi amaçlanmaktadır (Adams, 2005).

2.4.4. Amalgamasyon

Eski dönemlerde özellikle gravite yöntemi ile elde edilen altın konsantrelerinin civa ile bir araya getirilerek, altının civa ile bir alaşım oluşturması, bu sayede cevher içeriğindeki safsızlıklardan ayrılması sağlanmıştır. Amalgamasyon olarak adlandırılan bu yöntemde civa, altın ile bir araya getirilerek amalgam (Au_xHg_y) alaşımını oluşturmaktadır.

Altının bu alaşımdan ayrıştırılması, elde edilen alaşımın ısıtılarak civanın ortamdan buharlaştırılarak uzaklaştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Akdağ, 1986). Amalgam işlemi sonrasında elde edilen amalgam %20-50 arasında değişen oranlarda altın içermektedir. Amalgamasyon sonrasında, varsa, cevher içerisinde kalan ince boyutlardaki altın, siyanür liçi ile kazanılmakta ve kaçakların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Cevher yapısında arsenik ve antimuan varlığında amalgamasyon işlemi öncesinde konsantreye yüksek ısı verilerek arsenik ve antimuanın (As_2O_3 - Sb_2O_3) uzaklaştırılması sağlanmaktadır (Akdağ, 1986).

Amalgamasyon geçmiş yıllarda altın zenginleştirmede yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına rağmen civanın insan ve çevre sağlığına olan etkilerinden dolayı günümüzde tercih edilmemektedir (Çilingir, 1996).

2.4.5. Aglomerasyon

Kömür-yağ aglomerasyonu özellikle ince taneli altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde uygulanan potansiyel yeni yöntemlerden biridir. Yöntem, düşük tenörlü ve ince altın tanelerinin (1-5 μm) ekonomik olarak kazanılması amacıyla geliştirilmiştir. Gerek siyanürle zenginleştirmenin neden olabileceği çevresel zararları engellemek, gerekse diğer yöntemlerin ince taneli altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde gösterdikleri düşük performanslara alternatif olarak bu yöntem uygulanabilmektedir (Seyrankaya, 2001).

Bu yöntemde ince öğütülmüş cevher, kolaylıkla yüzdürülen kömür ve özel aglomerasyon yağı ile şartlandırma tankında karıştırılmaktadır. Karıştırma sonucunda altın taneleri kömür içerisine hapsedilerek kömür aglomeratlarını oluşturmaktadır. Şartlandırma süresinin uzatılması aglomeralardaki altın konsantrasyonunu arttırmaktadır. Altınlı kömür aglomeratların pülpten ayrıştırılması ise flotasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Flotasyon ile elde edilen bu ön konsantrenin kavrulması ile altının pirometalürjik olarak eldesi sağlanmaktadır (Çilingir, 1996).

Aglomeratların üretimi birçok yolla gerçekleştirilmektedir. Aglomerasyonun sağlanması için elektrolit kullanımı bu yöntemlerden biridir. Diğer bir yöntem polimerik flokülant kullanımıdır. Kullanılan flokülant tanecikler arasında polimer köprüleri oluşturmakta ve böylelikle aglomerasyon sağlanmaktadır. Üçüncü metot ise yağ kullanılarak aglomerat üretimidir. Kullanılan yağ, kömür tanelerinin yüzeyini film tabakası şeklinde kaplayarak tanelerin çarpışması sonucunda taneler arası sıvı köprüleri oluşturarak aglomeratların oluşmasını sağlamaktadır. İnce kömürlerin zenginleştirilmesinde uygulanan bir yöntem olan aglomerasyon flotasyon ile birleştirilerek farklı boyutlardaki altın tanelerinin zenginleştirilmesine olanak tanımaktadır (Şen, 2000). Ancak, altın cevherinin pirit, arsenopirit ya da diğer sülfür mineralleri de içerdiği durumlarda, kömür-yağ aglomerasyonu etkili olmamaktadır (Akçıl, 1998).

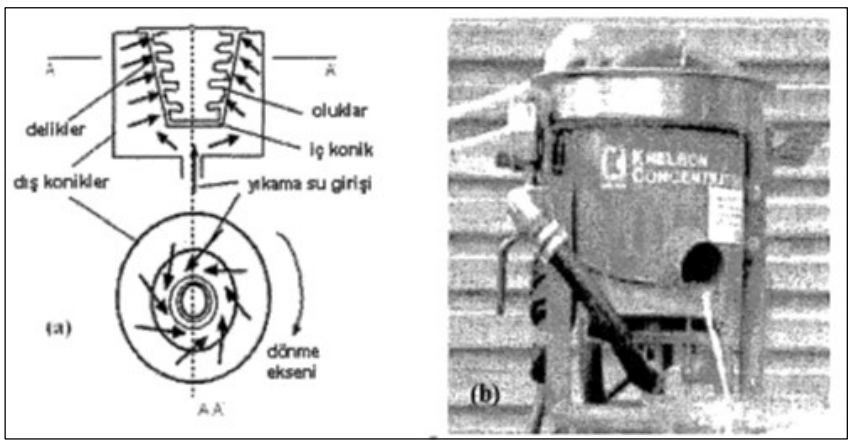
Bu yöntemi etkileyen faktörler, besleme tane boyutu, pH, sıcaklık, pülp katı oranı, hidrofobik altın tanelerinin homojen karışımı, kullanılan reaktiflerin miktarı ve seçimliği, yağ tipi, kömür/ oranı ve grafit/yağ oranı, aglomerat / cevher oranı olarak sıralanabilir.

3. KNELSON AYIRICISI

Gravite ayırıcıları, değerli mineral ve gang minerali arasındaki özgül ağırlık farkının yüksek olduğu durumlarda tercih edilse de, geleneksel gravite ayırıcılarında tane boyutunun ufalması ile ayırma etkinliğinin azaldığı bilinmektedir. Ancak santrifüj kuvveti ile graviteye kıyasla çok daha yüksek kuvvetlerin elde edilmesi sayesinde, ince boyutlarda dahi yüksek ayırma etkinliği elde edilmesi mümkün hale gelmektedir.

Damar tipi ve alüvyal tipteki altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde hızlı ve kullanışlı olan bir cihaz olan Knelson ayırıcısı Byron Knelson tarafından 1988 yılında Kanada'da icat edilmiştir. Basit bir tasarıma sahip olan Knelson ayırıcısı, yüksek kapasitenin yanı sıra geniş bir tane boyut aralığında çalışma olanağı sunmaktadır. Yüksek santrifüj kuvveti etkisiyle <30 μm'dan ufak tanelerden 6 mm'ye geniş bir tane boyut aralığında ayrım yapabilmektedir (Alp vd., 2004). Knelson ayırıcıları altının yanı sıra platin, kurşun, gümüş, bakır gibi metallerin zenginleştirilmesinde, endüstriyel hammaddelerin temizlenmesi ve ince boyutlardaki kömürün kazanımı için kullanılabilmektedir.

Knelson ayırıcısı basit olarak dönen ünite ve hızla dönen bir yataktan oluşmaktadır. Cihazın alt kısmında ise beslenen malzemeyi dağıtacak pervane sistemi bulunmaktadır. Beslenen pülp sistem içerisine yukarıdan verilmekte hafif olan gang mineraller üst akıştan artık olarak sistemden uzaklaştırılırken, ağır olan mineral(ler) yatağın içine dolmaktadır Şekil 3.1'de ayrıcının yatay-düşey kesitleri ve genel bir görünüşü gösterilmektedir.

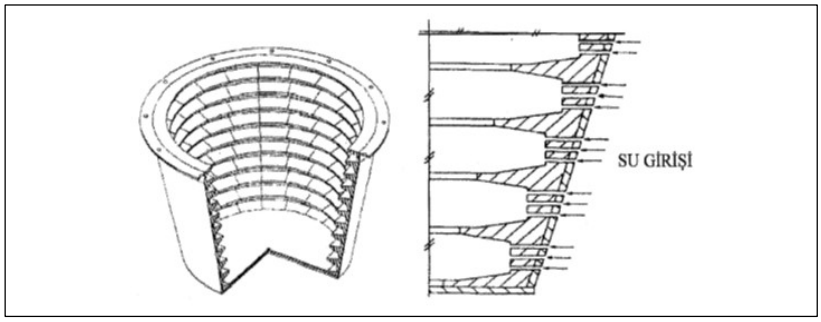


Şekil 3.1. Knelson ayırıcısının (a) düşey ve yatay kesiti, (b) genel görünümü

3.1.1. Knelson ayırıcısının çalışma prensibi

Knelson ayırıcısı yüksek dönme hızı sayesinde ortalama olarak 60 G'lik bir kuvvet oluşturabilmektedir (Huang, 1996). Ayırıcıya beslenen katı oranı %10-70 oranında değişkenlik gösterebilmektedir. Knelson ayırıcısının kapasitesi özgül ağırlıkça farklı olan minerallerin cevher içerisindeki oransal dağılımı ve cevherin serbestleşme derecesine bağlı olarak değişmektedir Knelson ayırıcısının çalışma parametreleri, santrifüj kuvveti, yıkama suyu debisi, besleme katı oranı ve alıkonma süresidir (Magumbe, 2002).

Cihaza hazne içindeki oluklarda bulunan deliklerden su verilmektedir. Bu sayede cevherin yıkanması ve konsantrenin hücrenin dibine çökmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle, yıkama suyu debisi cevherin tane boyut dağılımı, besleme katı oranı ve malzemeler arasındaki yoğunluk farkına göre değişkenlik göstermektedir (Öney ve Samanlı, 2017). Benzer sistemlerle karşılaştırıldığında tasarım açısından farklılık gösteren cihazın önemli avantajlarından biri de şlamlaştırma yapmadan çok ince boyutlu altın taneleri için bile yüksek verimler sağlamasıdır. Knelson ayırıcısının iç koniğinin yapısı ve oluklar içerisindeki su giriş mekanizması Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Knelson ayırıcısının iç koniğinin şematik görüntüsü

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan gravite ayırıcılardan biri olan Knelson ayırıcılar kesikli ve sürekli sistem olarak iki farklı tipte üretilmektedir. Kesikli tip ayırıcılar; elle boşaltma serileri, merkezi boşaltma serileri, genişletilmiş seriler ve Quantum modelleri gibi dört farklı çalışma prensibine sahiptirler (Nesset, 2011).

3.1.2. Kesikli tip Knelson ayırıcıları

1990'ların ortalarında, merkezi boşaltma ünitesi geliştirilmiş ve bu geliştirmenin diğer Knelson cihazlarında kullanımı sağlanmıştır. 1990'lı yılların sonuna doğru sürekli tip gravite ayırıcılar endüstride yerini almıştır. Beslemenin merkezden yapılmasını sağlayan geliştirme 1992 yılında yapılmış, bu sayede cihazların otomasyon kontrollü olması sağlanmıştır. Hacimce revize edilerek genişletilen bakım kolaylığı ve uzun kullanım ömürleri nedeniyle merkezden boşaltma serilerine göre daha avantajlıdırlar. 2010 yılında Knelson'un son ürünü olan "Quantum Serisi" tanıtılarak, piyasada güzel bir pazar yakalanmış ve yeni tasarımının yanında daha ekonomik oluşuyla ilgi görmüştür. (Öney ve Samanlı, 2017, Corsan, 2011). Şekil 3.3'de endüstriyel ve laboratuvar tipteki Knelson ayırıcıları gösterilmiştir.



Şekil 3.3.Knelson ayırıcısı modelleri

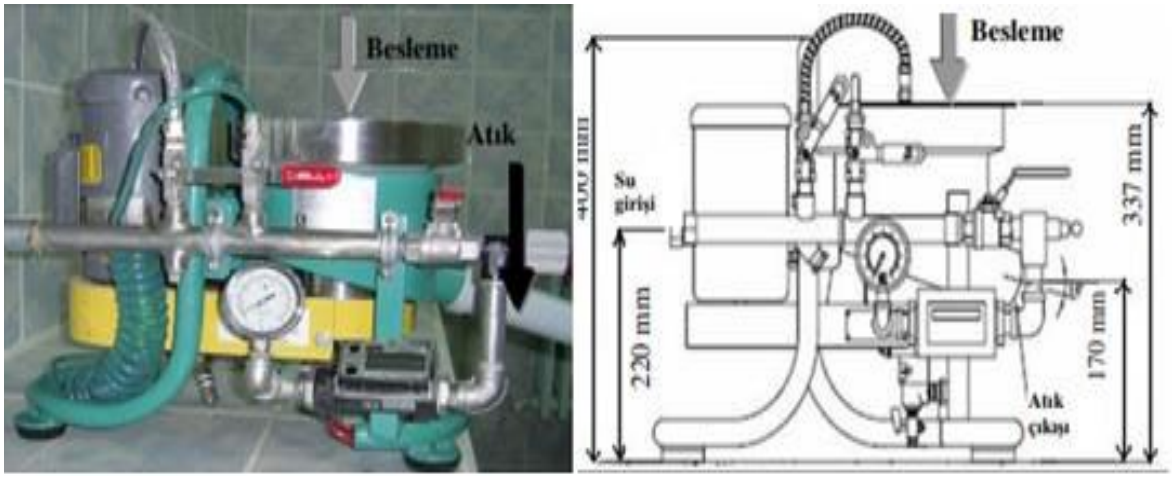
Knelson ayırıcılarının ilk üretildiği modeller olan kesikli çalışan cihazlar, beslenen cevherin niteliği ve tenörüne göre değişen 0,5-5 t/s kapasiteye sahiptir. Kesikli tip cihazların eski modellerinde konsantrenin cihazdan uzaklaştırılması için belirli periyotlarla beslemenin kesilerek cihazın durdurulması ve konsantre hücresinde toplanan malzemenin tazyikli su yardımı ile yıkanarak elde edilmesini gerektirmektedir. Güncel olarak üretilen modeller ise konsantrenin sistemden kendiliğinden uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde geliştirilmişlerdir.

Kesikli tip Knelson ayırıcılarının verimliliğini etkileyen üç parametre, yıkama su miktarı, cevherin besleme hızı ve motor dönüş hızıdır. Besleme su debisi cevherin tane boyut dağılımı, cevher yapısı ve pülp katı oranına göre belirlenmektedir. Cevher besleme hızını zenginleştirilecek cevherin serbestleşme tane boyu ve cihaza beslemenin gerçekleştirildiği eleğin performansı gibi parametrelere göre değişebilmektedir. Motor dönüş hızının belirlenmesinde yüksek özgül ağırlığa sahip malzemenin, düşük özgül ağırlıklı malzemeye oranı ve serbestleşme tane boyu parametreleri dikkate alınmaktadır (Öney, ve Samanlı, 2017).

Otomatik bir Knelson ayırıcısında yıkama ile boşaltma işlemi yaklaşık 2-3 dakika sürmektedir. Bu ayırıcılar %70 katı oranına kadar iyi performans göstermektedir. Kesikli tip laboratuvar ölçekli Knelson ayırıcısı 45 kg/saat kapasiteyle çalışabilirken, endüstriyel ölçekli cihazlarda kapasite 1000 ton/saat'e kadar çıkabilmektedir (McLeavy, 2005; Öney ve Tanrıverdi, 2012). Laboratuvar ve endüstriyel ölçekli kesikli tipteki Knelson ayırıcıları ve çalışma parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Şekil 3.4'te ise laboratuvar ölçekli kesikli tip Knelson ayırıcısı ve ayırıcının kesiti şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Kesikli tip Knelson ayırıcılar ve teknik özellikleri

Model	Besleme Kapasitesi (t/saat)	Su Miktarı (m^3/s)	Santrifüj Kuvveti (G)	Tane İriliği (mm)	Konsantre Ağırlığı (kg)	Cihaz Ağırlığı (kg)	Motor Gücü (Hp)
Elle boşaltma serileri (It/dk)							
KC-MD 3	0.045	0,7-4.5	80-150	2	0.80-0.15	28	1/4
KD-MD 4.5	0,275	11-19	—	2	0,2-0.35	113	%
KC-MD 7.5	0.680	45-68	—	5	0.7-1.0	113	%
Merkezi boşaltma Serileri (m^3/saat)							
KC-CD10	8	3-6	60	6-2	2-5	295	2
KC-CD12	20	3-10	60-150	6-2	2.7-9	260	2
KC-CD20	80	8-18	60-150	6-2	9-27	900	10
KC-CD30	100	14-39	60-150	6-2	18-59	1565	15
Genişletilmiş seriler (m^3/saat)							
KC-XD20	80	8-18	60-200	6-1.7	9-29	1043	7,5-10
KC-XD30	150	17-39	60-200	6-1.7	18-59	1724	15-30
KC-XD40	250	23-61	60-200	6-1.7	31-103	3977	40-75
KC-XD48	400	28-86	60-200	6-1.7	34-116	5680	40-100
KC-XD70	1000	68-86	60-120	6-2	95-125	18455	200-500
Quantum Serileri (m^3/saat)							
KC-QS30	150	14-39	60-200	6-2	23-39	1678	15-30
KC-QS40	250	23-73	60-200	6-1.7	31-103	3320	40-75
KC-QS48	400	28-86	60-200	6-1.7	34-107	5225	40-100



Şekil 3.4. Labarutuvar tipi Knelson ayırıcısının fotoğrafı ve şematik görünüşü

3.1.3. Sürekli tip Knelson ayırıcıları

Özellikle beslenen cevher içeriğinin yüksek tenörlü olduğu durumlarda kesikli tip Knelson ayırıcılarının sık sık durdularak konsantrenin yıkanması ve boşaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle sürekliliğin önem arz ettiği, yüksek kapasiteli zenginleştirme tesislerinde, beslemeyi durdurmadan konsantrenin hızlı ve verimli şekilde kazanıldığı santrifüj ayırıcılarına ihtiyaç duyulmuştur. Kesikli tip ayırıcılarda meydana gelen üretim kayıplarının önlenmesi amacıyla kesintisiz olarak ayrıştırma yapan Knelson ayırıcılara sürekli tip Knelson ayırıcılar denilmektedir.

Üretici firma tarafından tasarlanarak satışa sunulan sürekli tipteki Knelson ayırıcılar Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Sürekli tip Knelson ayırıcılar 2 ton/saat kapasitesinden 300 ton/saat kapasitesine kadar çıkan ürünlerdir. Bu modellerde besleme üst boyutu ~1 mm'dir (Öney ve Samanlı, 2017).

Çizelge 3.2. Sürekli tip Knelson ayırıcılar ve teknik özellikleri

Model	Besleme Kapasitesi (t/saat)	Sıı Miktarı (m^3/saat)	Santrifüj Kuvveti (G)	Hava Miktarı ($ıı^3$/dk)	Cihaz Ağırlığı (kg)	Motor Gücü (Hp)
KC-CVD 6	2	0,9-1,8	30-90	5.9	230	1
KC-CVD 20	35	3-9	30-90	6	2500	15
KC-CVD 32	80	16-34	30-90	5.1	6800	40
KC-CVD 42	120	11-23	30-90	-5,1	7000	40-50
KC-CVD 64	300	9-27	30-90	18.7	18200	100-200

4. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI

Bir ürünün üretilmesi ya da sürecin gerçekleştirilmesi bir veya birden fazla parametreye bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu parametrelerde kontrollü ya da kontrol dışında meydana gelen değişimler, elde edilmek istenen sonuç üzerinde çok farklı etkilere neden olabilmektedir.

Geleneksel olarak bu parametrelerin kontrolü ya da çıktı üzerindeki etkileri, diğer parametrelerin sabit tutulurken, yalnızca bir parametrenin çıktı üzerindeki etkisinin gözlenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. İstatiksel deney tasarımı (İDT) ise çıktı veya çıktıları etkileyen parametrelerin etkilerinin sistematik olarak incelenmesini amaçlayan istatiksel bir yaklaşımdır (Montgomery, 2012).

İDT yaklaşımının temellerinin, aynı zamnda varyans analizinin (ANOVA) geliştiricisi olan Fisher tarafından, 1920-1930'lu yıllarda atıldığı kabul edilmektedir. İlk İDT uygulamarı 1960'larda tarım alanında yapılmış olup, bu uygulamalar hava durumu, toprak kalitesi, gübre gibi değişkenlerdeki değişimlerin farklı türdeki ürünlerin verimlilikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamıştır (Şirvancı, 1997; Luftig ve Jordan, 1998). İlerleyen yıllarda İDT yöntemleri farklı yaklaşımların ortaya konulmasıyla daha gelişmiştir. Box ve Wilson'ın 1950'lerde "yüzey cevap yöntemlerini ortaya koyarken (Montgomery, 2012), Taguchi 1980'li yıllarda "robust tasarım" yaklaşımıyla süreçte kontrol edilemeyen parametrelerin etkilerine dikkat çekmiştir (Saat, 2000). Günümüzde bilgisayar teknolojilerin gelişmesi İDT'nin gıda, tarım, hayvancılık, eczacılık, mühendislik ve hizmet sektörü gibi birçok alanda pratik bir şekilde kullanılmasına ön ayak olmuştur (Acıtaş ve Şenoğlu, 2010).

Cevher zenginleştirme konusunda da İDT yöntemlerinin uygulandığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Piga vd., (1998) kompleks bir sülfür cevheri için liç verimliliğini İDT yöntemleri kullanarak araştırmıştır. Veglio ve Belardi (2000) ince kromit cevherinin, Multi-Gravite Ayırıcısı ile zenginleştirilmesinde, Martinez L vd., (2002) selestit cevherinin flotasyon ile zenginleştirilmesindeki etkinliklerini İDT yöntemleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Anderson (2006) yaptığı çalışmada kobalt cevheri işleyen bir tesisin

optimizasyonunda İDT yöntemleri kullanmıştır. Simate ve Ndlovu (2007) bakteri liçi ile nikelin zenginleştirme olanaklarını araştırdıkları çalışmada yine yöntemlere başvurmuştur.

İDT uygulamaları kömür zenginleştirme araştırmalarında da yaygın olarak kullanılmıştır. Aslan (2007) yılında yaptığı çalışmada Multi-Gravite ayırıcı parametrelerinin kömür zenginleştirmedeki etkinliğini merkezi kompozit dizayn ile araştırmıştır. Şahbaz (2013) yaptığı çalışmada linyit flotasyondaki optimum şartları belirlemek için deney tasarımı yöntemlerini kullanmıştır. Oluklulu ve Koca yaptıkları çalışmalarda düşük kalitedeki linyitlerin zenginleştirilmesinde MGS'nin çalışma parametrelerini faktöriyel tasarımlar kullanarak incelemiştir (Oluklulu ve Koca, 2018a; Oluklulu ve Koca, 2018b).

4.1. Klasik Yöntem

Klasik yöntem, bir çıktı üzerinde etkili olan değişkenlerin etkisini diğer bütün koşulların sabit tutulmasını esas almaktadır. Her bir değişkenin teker teker incelenmesi bu yaklaşımın her seferinde bir faktör ya da "One Factor At a Time (OFAT)" olarak isimlendirilmesine neden olmuştur (Czitrom, 1999; Qu ve Wu, 2005; Frey ve Jugulum, 2006).

Her seferinde tek bir değişkenin, tek bir durumda çıktı üzerindeki gözlemlemeyi amaçlayan bu yöntemde, kontrol edilemeyen koşulların etkileri belirlenememekte, çıktıyı doğrudan etkilemediği düşünülen etkiler ihmal edilmekte ve parametrelerdeki değişimlerin birbirleri üzerinde yarattığı etkiler gözden kaçırılmaktadır. Üstelik etkenlerin çıktı üzerinde ne kadar etkili veya etkisiz olduğunu belirlemek bu yaklaşımda kesikli olarak deney yapıp, sonucu kontrol etmeyi gerektiren uzun ve maliyetli bir süreç gerektirmektedir (Czitrom, 1999; Oluklulu, 2014). Bu dezavantajlar deneysel çalışmalarda klasik yöntemden uzaklaşılarak istatistiksel deney tasarım yöntemlerinin tercih edilmesine neden olmuştur.

4.2. İstatistiksel Yöntemler

İDT, yapılacak çalışmaların sürecini belirleyen ve elde edilen sonuçların yorumlanmasına doğrudan etki eden bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanıldığı çalışmalarda sürecin işleyişi, iyileştirilmesi, sonuca etki eden faktörler, bu faktörlerin etkilerinin

büyüklükleri ve birbirleriyle olan etkileşimleri gibi çok sayıda verinin ortaya konulması mümkündür. İlave olarak, istatistiksel yöntemler bir süreç içerisinde müdahale edilemeyen etkenlere karşı kontrol sağlamak amacıyla sağlam (robust) tasarımlar geliştirilmesine olanak tanımıştır.

İDT kendine özgü bir terminaloji ve metadolojiye sahiptir. İDT'te elde edilen sonuçlar "bağımlı değişken" ya da "yanıt" olarak ifade edilirken, bağımlı değişkeni ilgilendiren durum ve koşullar "bağımsız değişken" ya da "faktör" olarak isimlendirilmektedir. Her bir faktörün alabileceği farklı değerler ise o faktöre ait "seviyeler" olarak isimlendirilmektedir. Örnek olarak, bir seramik karonun sıcaklığa bağlı olarak mukavemetinin ölçüldüğü bir deney sistemin, karo mukavemeti yanıt olurken, sıcaklık "faktör" olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklığın alacağı her bir değer ise faktöre ait seviyelerdir.

Bu yaklaşımda bir ya da birden fazla faktör ve faktörlere ait seviyelerin, bir ya da birden fazla yanıt değişkeni üzerinden etkilerinin incelenmesi için yapılan sistematik çalışma deney tasarımı olarak isimlendirilmektedir. Deney tasarımının amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Montgomery, 2009):

- Yanıtı en çok etkileyen faktör ya da parametreleri belirlemek,
- Yanıtta arzulanan değere ulaşılmasını sağlayan faktör ve seviyelerini belirlemek,
- Yanıttaki sapma ve değişimleri en aza indirecek faktör ve seviyelerini belirlemek,
- Kontrol edilemeyen etkenlerin etkisini en aza indirecek şartları belirlemek.

İDT ürün ya da süreci etkikeyen, kontrol edilebilen faktörlerin sistemsel bir şekilde değiştirilerek yanıtta oluşan değişimleri anlamak için kullanılmaktadır. (Montgomery, 2009). Bu sayede deney süreci ve ortaya çıkan sonuçların doğru analiz edilmesi amaçlanmaktadır. (Croarkin ve Tobias, 2015)

4.3. Deney Tasarımı Aşamaları

İDT birçok adımdan oluşan bir süreçtir. İDT uygulanırken, deneylerin tasarlanmasında takip edilmesi gereken basamaklardan ilki ve en önemlisi problemin doğru tanımlanmasıdır. Problemin tanımlanması, elde edilmesi beklenen veriler ile problemin

çözülmesinde sonraki adımlar için belirleyici olmaktadır. Buna göre deney tasarımı aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Problemin tanımlanması,
- Faktör ve seviyelerinin seçimi,
- Yanıt değişkeni veya değişkenlerinin belirlenmesi,
- Uygun tasarım ve yöntemin seçimi,
- Deneylerin gerçekleştirilmesi,
- Elde edilen verilerin istatiksel analizi,
- Sonuçların yorumlanması.

Uygun olan deney tasarımı yöntemi seçilirken, deney sayısı, bloklama ve faktörler arasındaki etkileşimler gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer yanıt değişkeni, etkisi seçilen diğer bir faktörün seviyesine bağlı olarak değişiyorsa faktörler arası etkileşimden söz etmek mümkündür. Faktörler arası etkileşimlerin bulunması durumunda tasarım seçilirken bu durum göz önüne alınmalıdır. Yöntem belirlendikten sonra ise tasarıma uygun şekilde doğru ve rastgele deneysel çalışmalara başlanabilecektir.

Deneyler ile elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan değerlendirilmesi için SPSS, SAS MATLAB, Design Expert, MINITAB gibi programlar tercih edilebilmektedir (Rakic vd., 2014; Dashti ve Nasab, 2012; Trinh ve Kang, 2010). Varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirme yapan bu programlar etkenlerin belirlenen değişkenin oluşturduğu sonuçları analiz etmekte ve ayrıca çalışma içerisindeki hata paylarını da göstermektedir. ANOVA ile yanıt değişkeni üzerinde etkisi belirgin olan faktörler tespit edilerek, regresyon analizi ile işlemleri tamamlayan bir model oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu model faktöriyel tasarımlarda faktörlerin doğrusallığını göstermektedir. Cevap yüzeyi yöntemleri ise faktörlerin hem doğrusallığını (lineer) hem de karesel (quadratic) sonuçlarını araştırmaya olanak tanımaktadır (Croarkin ve Tobias, 2015).

4.4. Varyans Analizi (ANOVA)

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin analizi ve yorumlanmasında kullanılan temel yöntem olan ANOVA, yanıt değişkeni üzerindeki etkileri kontrol edilebilir

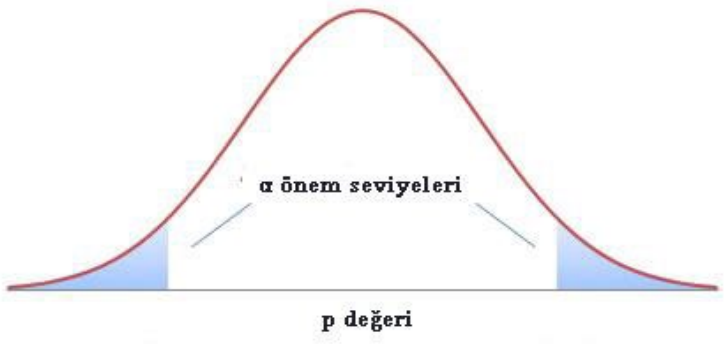
olan faktörleri ve deneysel çalışmalar sırasında olabilecek sorunlardan meydana gelecek farklılıkları hesaplamakta kullanılmaktadır (Gupta ve Parsad, 2012).

Deneyler sonucunda ulaşılan verilerin ANOVA ile değerlendirilmesinden önce, örneklerin ortalamaları ile ana kütle ortalaması arasında farklılık olup olmadığını tespit eden hipotez testleri oluşturulmalıdır. Bunlardan ilki olan H_0 hipotezi, her bir deney sonucu ortaya çıkan bulgunun ($\mu 1$, $\mu 2$, $\mu 3$,...) ana kütle ortalaması (μ) ile aralarında herhangi bir değişim olmadığını kabul eder. Alternatif bir hipotezde ise ($H_{1)}$ yanıt değişkenine ait verilerin ana kütle ortalaması ile arasında bir sapma olduğu kabul edilir (Eşitlik 4.1 ve 4.2).

$$H_0 : \mu i = \mu j, \forall i,j; i \neq j; i,j: 1,2,3,...k \quad (4.1)$$

$$H_1 : \mu i \neq \mu j \neq ....\neq \mu i,j \quad (4.2)$$

Söz konusu hipotez testlerinin geçerliliği F testi yardımı ile tespit edilmektedir. F testi veriler üzerinden p (olasılık) değerlerini saptamakta kullanılmaktadır. Verilerden elde edilen p değerleri ile Şekil 4.1'te gösterilen grafik elde edilmektedir. Bu grafikteki taralı alanlar α önem seviyesi olarak ifade edilmekte ve p değerlerinin en düşük olduğu ve H_0 hipotezinin reddedileceği aralığı ifade etmektedir (Gionet, 1963). Hipotezlerde kabul edilen ve kullanılan önem seviyeleri 0,1, 0,05, 0,01 şeklinde ifade edilmektedir ve bu seviyeler sırasıyla %90, %95, %99 güven aralıklarına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.1. Olasılık grafiği

ANOVA ile p değerlerinin tespit edilmesinde Çizelge 4.1'de verilen ANOVA tablosundan yararlanılmaktadır. Tabloda "Değişken Kaynağı" sütununda yer alan A, B, C terimleri cevap değişkenindeki değişimi oluşturan ana faktörleri ifade etmektedir. İki terimin yanıt değişkenleri üzerindeki etkilerinin etkileşimleri ise AB ve AC gibi ikili terimler ile

gösterilirken, etkileşimi ifade edilen faktör sayısı arttıkça terim sayısı da artmaktadır. Örneğin, ABC üçlü etkileşimi ifade ederken, ABCD dörtlü etkileşimi ifade etmektedir. Faktörlerin karesel etkileri ise A^2, B^2 terimleri ile gösterilmektedir. ANOVA sonucunda bulunan p değerlerinin cevap değişkeni üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Eşitlik 4.3'te verilen karar kuralına göre belirlenmektedir.

Çizelge 4.1. Varyans analizi tablosu

Değişken Kaynağı	Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ort. (MS)	F Değeri	p Değeri
Model	(abc-1)				
A	(a-1)	SS_A	MS_A	MS_A / MS_{Hata}	
B	(b-1)	SS_B	MS_B	MS_B / MS_{Hata}	
C	(c-1)	SS_C	MS_C	MS_C / MS_{Hata}	
AB	(a-1)(b-1)	SS_{AB}	MS_{AB}	MS_{AB} / MS_{Hata}	
AC	(a-1)(c-1)	SS_{AC}	MS_{AC}	MS_{AC} / MS_{Hata}	
BC	(b-1)(c-1)	SS_{BC}	MS_{BC}	MS_{BC} / MS_{Hata}	
ABC	(a-1)(b-1)(c-1)	SS_{ABC}	MS_{ABC}	MS_{ABC} / MS_{Hata}	
A^2	(a-1)	SS_{A^2}	MS_{A^2}	MS_{A^2} / MS_{Hata}	
B^2	(b-1)	SS_{B^2}	MS_{B^2}	MS_{B^2} / MS_{Hata}	
C^2	(c-1)	SS_{C^2}	MS_{C^2}	MS_{C^2} / MS_{Hata}	
Hata	(n-ab)	SS_{Hata}	MS_{Hata}	F_{Hata}	
Toplam	(n-1)	SS_{Toplam}			

$$P<\alpha \; veya \; F>F_{\text{tablo}} \rightarrow H_0 \; red \tag{4.3}$$

4.5. Faktöriyel tasarımlar

Faktöriyel tasarımlar, yanıt değişkenini etkileyen iki veya daha fazla faktör varlığında, faktörlerin yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini incelemek amacıyla oluşturulmuşlardır. Faktöriyel tasarımlar seviye sayıları eşit olan çok sayıda faktör ile oluşturulabilmektedir. Özel haller dışında faktöriyel tasarımlar a^k şeklinde ifade edilmektedir. Burada a seviyesini, k ise faktör sayısını ifade etmektedir. Faktöriyel tasarımların özel uygulamaları dışında yaygın olarak kullanılanları tam faktöriyel tasarımlar, kesirli faktöriyel tasarımlar, Plackett-Burman tasarımı ve Taguchi yöntemi olarak sıralanabilir.

4.5.1. Tam faktöriyel tasarımlar

Tam faktöriyel tasarımlar, belirlenen faktör ve faktörlere ait seviyelerin tüm olası kombinasyonlarında denemeler yapılmasını gerektirmektedir. Bu tasarımlarda deney sayısı (n) hesaplanması Eşitlik 4.4'te gösterilen eşitlik ile belirlenir (Montgomery, 2009). Burada k faktör sayısını, a faktörlere ait seviyelerin sayısını ve n ise gerçekleştirilen tekrar sayısını ifade etmektedir.

$$n=a^k*t \tag{4.4}$$

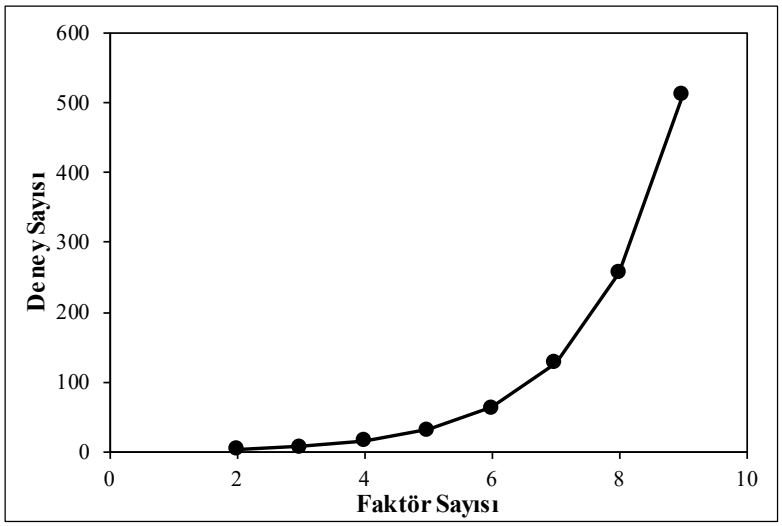
Çizelge 4.2'de 2 seviyeli, 4 faktör için örnek bir tasarım gösterilmiştir. Çizelgedeki "-" ifadesi faktörün düşük seviyesini, (+) ifadesi ise yüksek değerini temsil etmektedir. Böyle bir tasarım için olası tüm kombinasyonların sayısı 2^4=16'dır. Deneyler bir kez tekrarlandığında ise deney sayısı 16*2 olarak hesaplandığında 32'ye ulaşmaktadır.

Çizelge 4.2. 2^4 tam faktöriyel tasarım matrisi

Deney No	**Faktörler**			
	A	**B**	**C**	**D**
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-

Deney No	**Faktörler**			
	A	**B**	**C**	**D**
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Tam faktöriyel tasarımın önemli bir dezavantajı faktörlere ait seviyelerin bütün kombinasyonlarında gerçekleştirilecek deneylerin deney sayısını çok arttırmasıdır (Şekil 4.2). Bu durum, deney maliyetleri ve deneyler için gereken süreyi arttırarak, deney tasarımının etkinliğini azaltmaktadır (Oluklulu, 2014).



Şekil 4.2. Faktör sayısına göre deney sayısının değişimi

4.5.2. Kesirli faktöriyel tasarımlar

Tam faktöriyel tasarımlar özellike faktör sayısının fazla olduğu durumlarda çok sayıda deney gerektirdiğinden, faktörler arasındaki etkileşimlerin ihmal edilebilir olduğu durumlarda kesirli faktöriyel tasarımlar tercih edilmektedir (Acıtaş ve Şenoğlu, 2010). Kesirli faktöriyel tasarımlar, tam faktöriyel tasarımların belirli bir kesrinin (kısmının) gerçekleştirildiği tasarımlar olarak tanımlanabilmektedir. Kesirli faktöriyel tasarımlarda gerekli olan deney sayısı (n) Eşitlik 4.5 ile hesaplanabilmektedir. Eşitlikte a faktörlere ait seviye sayısını, k faktör sayısını ifade ederken, p tasarımın uygulanacak kesirini ifade etmektedir.

$$n=a^{kxp} \tag{4.5}$$

Örnek olarak 2 seviyeli 4 faktörden oluşan bir tam faktöriyel tasarımın ¼'lük kesri gerçekleştirilmek istendiğinde oluşacak deney sayısı 24x1/2 olarak ifade edilir. Aslında bu durum 2^4 = 16 deneyden oluşan bir tasarımda oluşacak dört bloktan, yalnızca rastgele bir bloğunun gerçekleştirileceğini ifade etmektedir Bu durumda, yalnızca faktörlerin yanıt değişkeni üzerindeki ana etkileri belirlenmiş olacaktır. Böyle bir tasarıma ait örnek bir gösterim Çizelge 4.3'te verilmiştir. Kesirli faktöriyel tasarımlarda dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise seçilen bloktan elde edilen verilerin eşdeşlik kavramıyla ifade edilebilmesidir. Örneğin 2^4 faktörün ¼ kesirli tasarımında elde edilen A ana etkisi, BCD üçlü etkilişimi ile eşteş, B ana etkisi ACD üçlü etkileşimi ile eşteştir.

Çizelge 4.3. 2^4 faktöriyel tasarımın ¼ kesirli tasarım matrisi

Deney No	Faktörler			
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-

Deney No	Faktörler			
	A	B	C	D
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

4.5.3. Plackett-Burman tasarımı

Plackett-Burman tasarımı, çok sayıda faktörün olduğu süreçlerde tasarımın mümkün olan en az deney sayısı ile test edilebilmesi için geliştirilmiştir. Plackett ve Burman tarafından geliştirilen tasarım ile 11 faktörün ana etkileri 12 deney ile ifade edilebilmektedir. Plackett-Burman tasarımı yanıt üzerinde etkisi olduğu düşünülen çok sayıda faktörün bulunduğu durumlarda faktörlerin ana etkilerini hızlı bir biçimde belirlemek üzere tasarlanmıştır. Plackett-Burman yönteminde faktörler arası etkileşimlerin belirlenmesi mümkün değildir (Sağol, 2016)

4.5.4. Taguchi yöntemi

Taguchi yöntemi, genellikle, kalite kontrol mekanizmalarında elde edilen bilgilerin istatistiksel olarak analiz edilmesinde tercih edilmektedir. Bu yöntem faktörlerin farklı seviyeleri arasından en uygun olanların tespit edilmesi için kullanışlı bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Güral, 2003).

Taguchi yönteminin, diğer yöntemlerden en önemli farkı gürültü faktörü olarak da adlandırılan, kontrol edilemeyen faktörleri de dikkate almasıdır. Gürültü faktörlerinin de dikkate alınması, Taguchi tasarımının sağlam (robust) tasarımlar tanımlanmasına neden olmuştur. Az sayıda deney ile çok çok sayıda faktörün etkisinin belirlenmesine olanak sağlamasına karşın, faktörler arası etkileşimlerin hesaplanması için uygun değildir. Bu nedenle Taguchi yönteminde faktör ve seviye seçimi dikkatle yapılmalıdır (Croarkin ve Tobias, 2015).

4.6. Cevap Yüzey Yöntemleri

Cevap Yüzeyi Yöntemleri ya da İngilizce bilinen karşılığı ile Response Surface Methodology (RSM), çok sayıda değişkenin birlikte değişebildiği durumlarda yanıt değişkinine bağlı karmaşık modellerin oluşturulmasına olanak tanıyan bir yöntemdir (Montgomery, 2009). RSM yöntemleri ilk olarak Box ve Wilson tarafından ortaya konulmuş, ancak günümüzde yaygın olarak uygulanan ve İDT'nin son basamaklarından bir olarak kabul edilen haline Box ve Hunter tarafından dönüştürülmüştür (Aslan, 2007).

RSM yöntemlerinin bu ismi almasının gerçekçesi, faktörlerin yanıt değişkeni üzerindeki etkilerinin üstel olarak da ifade edilebilmesidir. Bu sayede RSM yöntemlerinde faktör etki ve etkileşimleri üç boyutlu yüzey grafikleri olarak gösterilebilmektedir. Benzer bir yaklaşım 3 seviyeden oluşan tam faktöriyel tasarımlarda da uygulanabilir olmakla birlikte ortaya çıkan deney sayıları RSM'ye göre önemli ölçüde yüksektir. Örnek olarak 3 seviyeli 4 faktörün bulunduğu bir tam fakötriyel tasarımda deney sayısı $3^4 = 81$ olurken, RSM yöntemleri ile çok daha az sayıda deney ile daha çok verinin elde edilebilmesi mümkündür.

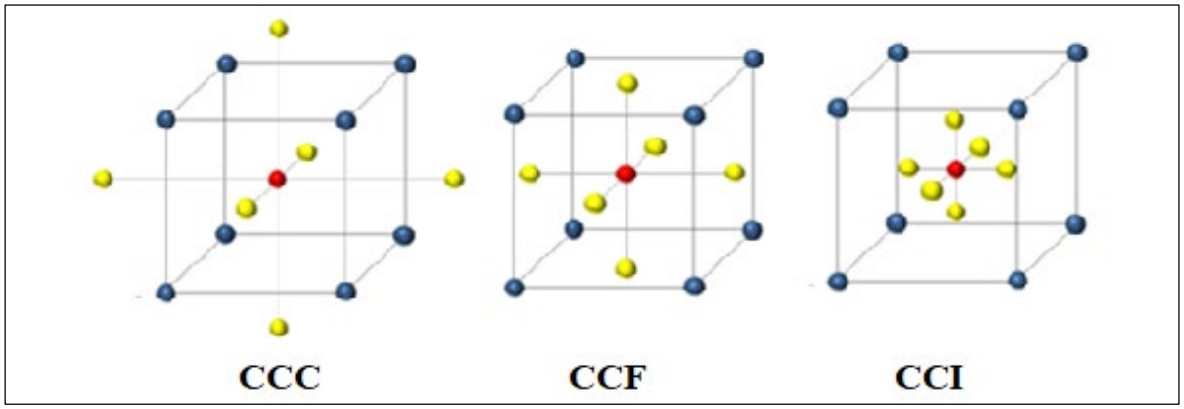
RSM, ürün üretimi ve süreçlerin kontrolünde en uygun koşulların belirlenmesinde, hataların giderilmesinde, gürültü faktörlerine karşı tasarımın iyileştirilmesinde tercih edilirler. Bu sebeple özellikle mühendislik alanında RSM uygulamaları sıkça kullanılmaktadır (Montgomery, 2012). Farklı RSM tasarımı uygulamaları olmasına karşın, en yaygın olarak kullanılan tasarımlar merkezi kompozit tasarımlar (CCD) ve Box-Behnken yöntemleridir (Baş, 2010). RSM tasarımlarında, faktörlerin, yanıt değişkeni üzerindeki yarattığı tüm sonuçlar tasarım evren kümesi olarak adlandırılan üç boyutlu bir düzlemde birer noktaya karşılık geldiği kabul edilir.

4.6.1. Merkezi Kompozit Tasarım

Faktöriyel tasarımlara kıyasla deney sayısı bakımından daha kullanışlı ve ektin bir şeçenek olan CCD, daha az sayıda deneyden elde edilecek bulgular ile daha fazla veri elde edebilme imkanı vermektedir (Aslan, 2007). CCD tasarımının önemli farklılığı, α değeri olarak adlandırılan eksenel noktaların kullanılmasıyla tasarım evrenin genişletlerek faktörlerin üssel etkilerinin daha net olarak ifade edilebilmesine olanak tanımasıdır (Jensen,

1995). Bu eksenel noktalar, faktör seviyelerinin düşük ve yüksek seviyelerinin bir basamak ötesinde tespit edilmektedir. CCD'de bulunan α değerinin belirlenmesinde faktör sayısı belirleyicidir (Croarkin ve Tobias, 2015).

Eksenel noktaları ifade eden α değeri bazı durumlarda kısıtlayıcı olacağından eksenel noktalara göre farklılık gösteren CCD yaklaşımları geliştirilmiştir (Şekil 4.3). Standart bir CCD matrisinin örnek bir gösterimi şekilde CCC ile ifade edilmiştir. Tasarım evreni dışında belirlenen eksenel noktalar sayesinde CCC dairesel bir simetriye sahiptir. Ancak 5 seviyenin uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda eksenel noktaların, faktörlerin düşük ve yüksek seviyelerinde belirlenmesi de mümkündür. Bu tasarımlar ise CCF olarak adlandırılmaktadır. Faktör seviyelerinin daha da dar aralıkta bulunması gerektiği durumlarda ise CCI adı verilen tasarımlar uygulanabilmektedir.(Croarkin ve Tobias, 2015).



Şekil 4.3. Alfa değerine göre CCD türleri

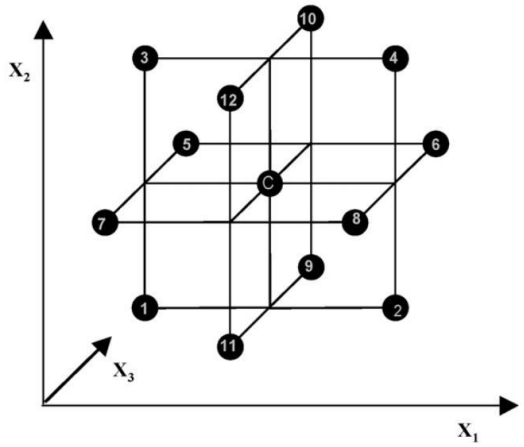
Eksenel noktalar farklı yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir, ancak yaygın olarak Eşitlik 4.6 kullanılmaktadır (Croarkin ve Tobias, 2015; Myers, 1971). Eşitlikte F faktöriyel noktaların sayısını, k ise faktör sayısını ifade etmektedir. Eştiliğe göre 4 faktörlü bir CCD tasarımında α değeri 2 olarak hesaplanacaktır. CCD ile oluşturulacak bir tasarımda deney sayısının hesaplanması ise Eşitlik 4.7'de gösterilmiştir. Eşitlikte n deney sayısını, k, t_0 ise orta noktalarda gerçekleştirilecek tekrar sayısını ifade etmektedir.

$$F = 2^k;\ \alpha = F^{1/4} \tag{4.6}$$

$$n = 2^k + 2k + t_0 \tag{4.7}$$

4.6.2. Box-Behnken

Box-Benkhen tasarımı, esas olarak tam faktöriyel tasarımdan yola çıkılarak oluşturulmuş bir başka RSM yöntemidir. Ancak, faktöriyel ve kesirli tasarım öğeleri içermediğinden ikinci dereceden bir tasarımdır. Bu tasarımda deney kombinasyonları tasarım evreninin merkezi ve kenar noktalarıdır. Box-Benkhen tasarımının uygulanabilmesi için en az 3 seviyeye sahip 3 faktör gerekmektedir. Bu gerekliliğe uyan bir Box-Benkhen tasarımın, grafiksel olarak Şekil 4.4'de gösterilmektedir (Ferreira vd., 2007).



Şekil 4.4. Üç faktörlü Box-Behnken tasarımı

Box-Behnken tasarımında gerekli deney sayısı Eşitlik 4.8 yardımıyla hesaplanmaktadır (Ferreira vd., 2007).

$$n=2k(k-1)+t_0 \tag{4.8}$$

Box-Benhken tasarımı CCD'ye göre daha az deney ile gerçekleştirilebilmesine rağmen, deney kombinasyonları çoğunlukla faktörlerin orta seviyelerinde gerçekleştirildiğinden, oluşturulan modelin tahmin yeteğinini düşürmektedir. (Croarkin ve Tobias, 2015). Eksik köşelerdeki deneylerin gerçekleştirilmesiyle bu sorun çözülse de, deney sayısının artması bu durumu dezavantajlı hale getirmektedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

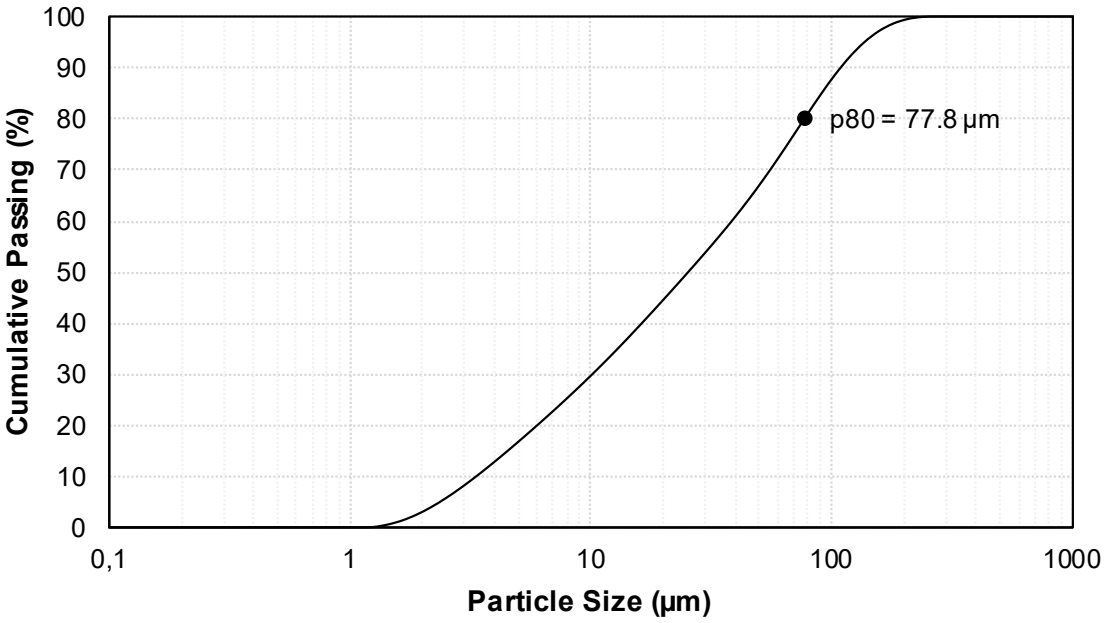
Bu çalışmada, 4,57 g/t Au içeriğine sahip oksitli bir altın cevherinin, Knelson ayırıcısı (MD3 laboratuvar ölçekli) kullanılarak zenginleştirilebilme olanakları araştırılmıştır. Bu kapsamda, istatiksel deney tasarımı yöntemlerinden faydalanılarak, en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında etkisi incelenen çalışma parametreleri; G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranıdır. Deneysel çalışmalara ait sonuçların değerlendirilmesi, elde edilen konsantrelerin altın tenörü ve verimi kullanılarak istatistiksel olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel verilerin yardımıyla G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranı parametrelerinin altın tenörü ve verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyan modeller oluşturulmuştur. Ayrıca parametrelerin etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri ANOVA verileri ve yüzey cevap grafikleri ile tartışılmıştır.

5.1. Materyal

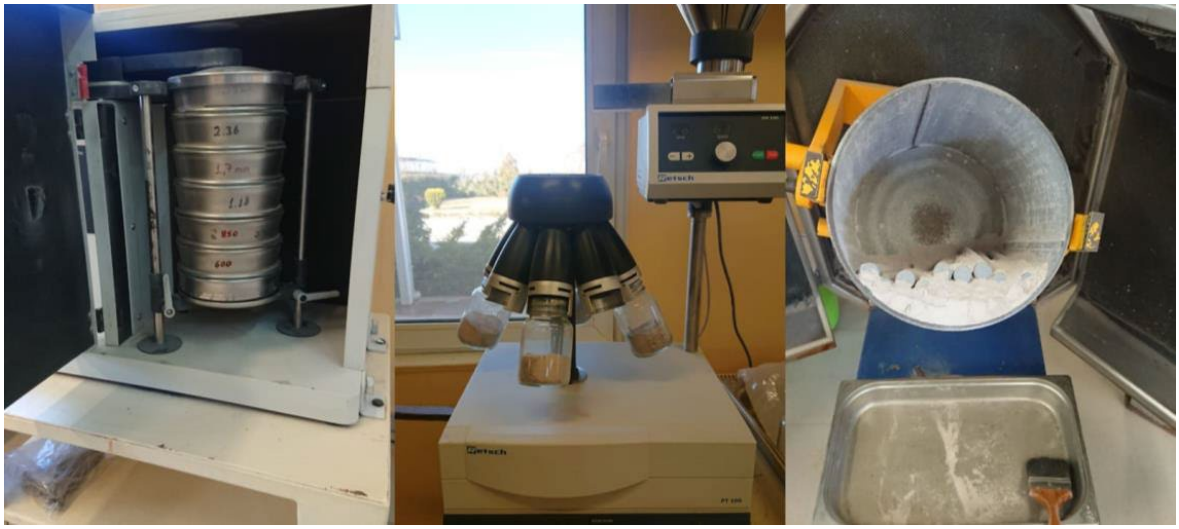
Çalışmada kullanılan tüvenan altın içerikli cevher saha çalışması yapılarak bir yığın üzerinden homojenlik dikkate alınarak örneklenmiştir. Cevher, ilk aşama olarak çeneli kırıcı ile 8 mm tane boyuna kırılmış, daha sonra aynı malzeme merdaneli kırıcı yardımı ile 3 mm tane boyuna indirilmiştir. Kırılmış malzeme, 500'er gram paketler halinde homojen olacak şekilde örneklenerek paketlenmiş ve çubuklu değirmende öğütülmek üzere hazırlanmıştır. Çalışma yapılmayan paketlenmiş yedek örnekler derin dondurucuda muhafaza edilerek saklanmıştır.

Çalışılacak tane boyutuna malzemenin öğütülmesi için, 305 mm çaplı ve 360 mm uzunluğunda çubuklu değirmen kuru öğütme şartlarında kullanılmıştır. Öğütücü ortam olarak kullanılan çubuklar paslanmaz çelik olup, toplam ortam ağırlığı 27360 g'dır. Yapılacak testlerde kullanılacak tane boyut tespiti için, zamana bağlı öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu deneyler sonucunda öğütme zamanı olarak 10 dk seçilmiş ve bu şartlarda hazırlanmış numunenin tane boyut dağılımı Şekil 5.1'de verilmiştir. Tane boyut analizleri Malvern Mastersizer Hydro 2000-MU cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kuru eleme

cihazı Retsch AS200 TAP, otomatik numune bölücü Retsch PT100, ve öğütme işlemlerinin yapıldığı Essa marka çubuklu değirmen görselleri Şekil 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5.1. Cevherin tane boyu dağılım grafiği



Şekil 5.2. Retsch AS200 TAP, Retcsh numune bölücü ve ESSA çubuklu değirmen

Cevherin besleme analizlerinde, Altın ve gümüş analizleri, Perkin Elmer AAS, diğer metal analizleri, The Agilent ICP-OES, kükürt ve karbon analizleri, LECO karbon ve sülfür cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cevhere ait kimyasal analizler Çizelge 5.1'de, tüvenan cevherde altının fraksiyonlara göre dağlımı ise, Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

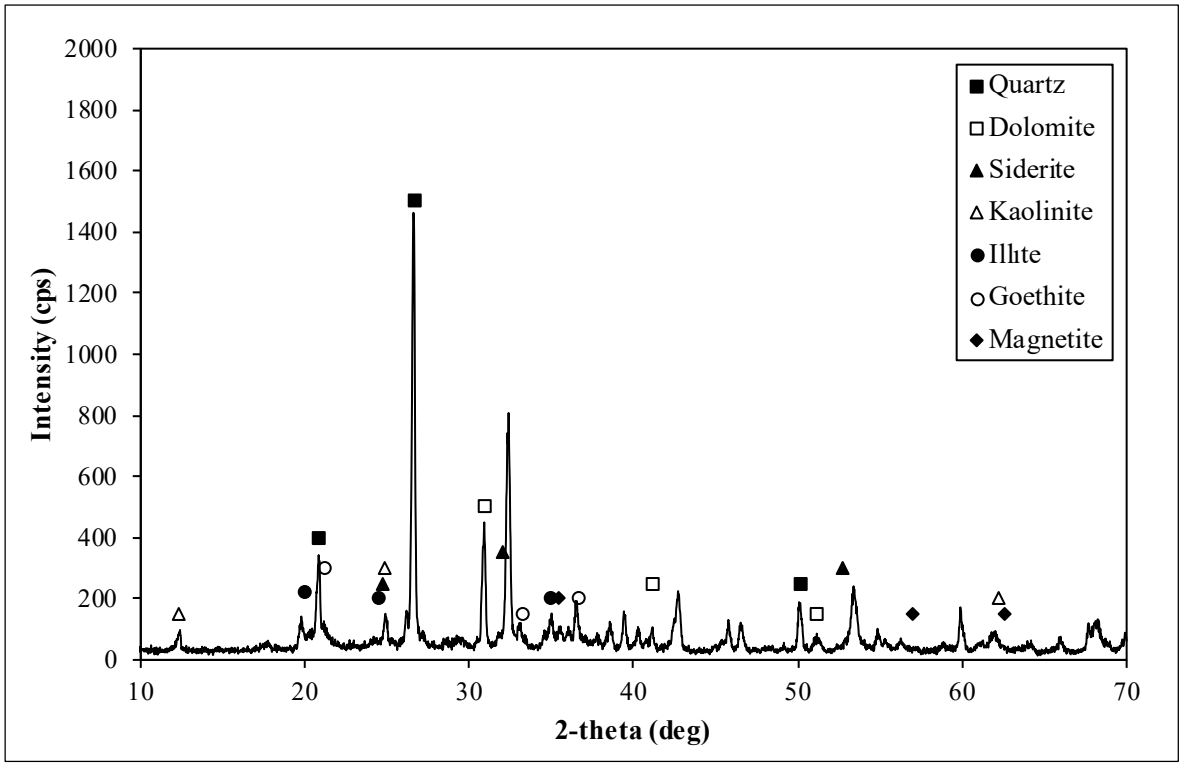
Çizelge 5.1. Tüvenan cevhere ait kimyasal analizler

Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (g/t)	Pb (g/t)	Zn (g/t)	Fe (%)	S (%)
4.57	1.38	29.96	79.23	13.8	1.21	0.22

Çizelge 5.2. Tüvenan cevherde fraksiyonlara göre altın dağılımı

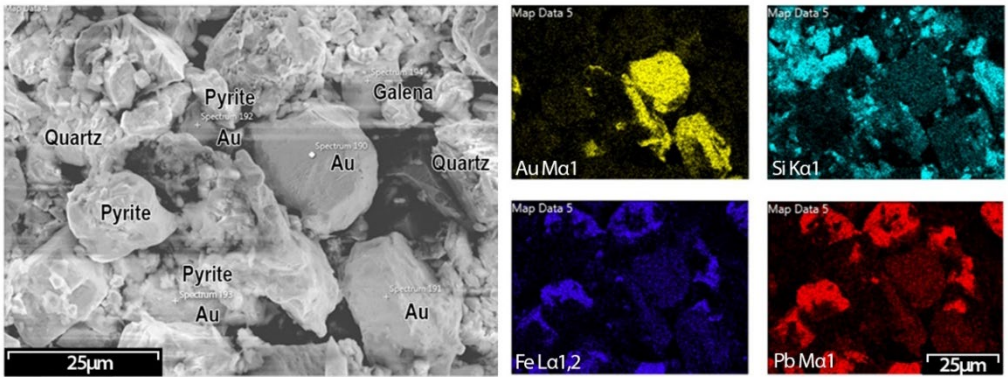
Boyut Fraksiyonu (µm)	Ağırlık (%)	Au (g/t)
+106	4,43	1,68
-106+75	14,03	1,69
-75+53	8,62	2,60
-53+38	4,86	5,11
-38	68,07	5,32

Çalışmada kullanılan cevhere ait XRD spektrumu Şekil 5.3'te verilmiştir. Buna göre, cevher yüksek miktarda kuvars ve mika minerallerinden oluşurken, orta miktarlarda da karbonat ve feldspat mineralleri içermektedir. Bu yapılara ek olarak düşük miktarlarda, sülfür içeren minerallerle birlikte magnezyum silikatlar ve kil minerallerine de rastlanmıştır.



Şekil 5.3. Tüvenan cevhere ait XRD spektrumu

Tüvenan cevherin silikatlardan uzaklaştırılarak kısmen konsantre hale getirilmesinden sonra numunenin EDX analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4). EDX analiz sonuçlarına göre, eser miktarda kalkopirit ve galen gözlemlenirken, piritin en bol bulunan sülfür minerali olduğu gözlemlenmiştir. Altın öncelikle serbest nabit altın şeklindedir. Bu nedenle cevher, düşük sülfür içeriğine sahip oksitlenmiş bir altın cevheri olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.4. Cevhere ait EDX analizi

5.2. Yöntem

Deneysel çalışmalar laboratuvar ölçekli Knelson MD-3 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar kapsamında Knelson ayırıcısının çalışma parametrelerinden G kuvveti, besleme hızı, yıkama suyu ve katı oranının altın örneğinin tenör ve verim değerleri üzerindeki etkisi ve bunların birbirleriyle olan etkileşimleri istatistiksel deney tasarım yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde 850 gramlık örnekler, belirlenen katı oranlarında sürekli olarak karıştırılarak, peristaltik pompa yardımı ile belirli besleme hızlarında Knelson ayırıcısına beslenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen konsantrelerin ve artıkların, kurutulup tartımı alındıktan sonra, kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin tasarımlandırılmasında özellikle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve mümkün olan en az sayıda deney ile faktörlerin yanıt değişkenleri üzerindeki etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimlerin değerlendirilmesine olanak tanıyan RSM yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden en önemlileri Box-Behnken ve Merkezi Kompozit Tasarım'dır. Ancak Box-Behnken tasarımında deneylerin önemli bir bölümü

faktörlerin orta seviyelerinde gerçekleştirildiği için oluşturulan modelin özellikle parametrelerin en düşük ve en yüksek seviyelerinde etkisini azalmaktadır (Croarkin ve Tobias, 2015). Bu nedenle deneylerin tasarımı Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Knelson ayırıcısının çalışma parametreleri ve bu parametrelere ait seviyelerin belirlenmesinde literatürde yer alan çalışmalardan faydalanılmıştır (Peacocke &Simpson, 2016). Parametre seviyelerinden düşük (-), orta (0) ve yüksek (+) noktalarına ek olarak CCD'de, düşük ve yüksek eksenel noktalar (-α ve +α) tayin edilmiştir. Alfa değeri Eşitlik 4.9'dan yararlanılarak 4 faktör için 2 olarak hesaplanmıştır. Buna göre deney tasarımında kullanılana faktörler ve bu faktörlere ait seviyeler Çizelge 5.3'te verilmiştir. Belirlenen parametre ve seviyelerin CCD yöntemi kullanılarak oluşturulan 30 deney içeren tasarım matrisi Çizelge 5.4'te gerçek ve kodlanmış değerler için verilmiştir.

Çizelge 5.3. CCD dizayn parametre ve seviyeleri

Faktör	Parametre	Birim	-α	-1	0	1	+α
A	G Kuvveti	g	40	60	80	100	120
B	Besleme Hızı	rpm	100	150	200	250	300
C	Yıkama Suyu	l/dk	1,5	2	2,5	3	3,5
D	Katı Miktarı	%	10	20	30	40	50

Sonuçların değerlendirilmesinde tenör ve verim, parametrelerin etkileriyle birlikte değişen iki ayrı yanıt değişkeni olarak analiz edilmiştir. Tenör ve verim için gerçekleştirilen ANOVA analizleri sonucunda, parametrelerin bu yanıt değişkenlerini temsil eden modeller ortaya çıkarılmıştır. Bu sayede, çalışmaya konu olan altın cevherinin Knelson ayırıcısı ile zenginleştirilmesinde etkisi incelenen parametrelerin tenör ve verim üzerindeki etkileri, bu etkilerin büyüklüğü ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri araştırılmıştır. Ayrıca, oluşturulan modeller ile altın tenör ve veriminin ayrı ayrı veya birlikte optimize edilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, cevhere doğrudan ve Knelson ayırıcısı ile zenginleştirilmesinden sonra Bottle Roll Testleri (BRT) yapılmıştır. Bu testler, %45 katı oranında 500 g numune ile 500 ppm sodyum siyanür kullanılarak 48 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Pülp pH'sı kireç kullanılarak 10,5-11,0'e ayarlanmıştır. Pülpten 2, 4, 8, 24 ve 32. saatlerde numuneler alınarak, karşılık gelen süreler için altın geri kazanımları belirlenmiştir.

Çizelge 5.4. Gerçek ve kodlanmış değerler için oluşturulan CCD Tasarım matrisi

Deney	Kodlanmış Değerler				Gerçek Değerler			
No	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	0	0	0	80	200	2,5	30
2	-1	-1	-1	-1	60	150	2	20
3	0	0	0	0	80	200	2,5	30
4	0	0	0	-α	80	200	2,5	10
5	+α	0	0	0	120	200	2,5	30
6	0	0	0	0	80	200	2,5	30
7	0	0	+α	0	80	200	3,5	30
8	0	0	0	0	80	200	2,5	30
9	0	0	0	+α	80	200	2,5	50
10	1	-1	-1	-1	100	150	2	20
11	-1	-1	-1	1	60	150	2	40
12	1	1	1	1	100	250	3	40
13	0	0	0	0	80	200	2,5	30
14	1	-1	1	1	100	150	3	40
15	1	1	-1	1	100	250	2	40
16	-1	1	1	1	60	250	3	40
17	-1	-1	1	1	60	150	3	40
18	0	0	-α	0	80	200	1,5	30
19	-1	-1	1	-1	60	150	3	20
20	1	1	1	-1	100	250	3	20
21	-1	1	-1	-1	60	250	2	20
22	1	-1	1	-1	100	150	3	20
23	1	1	-1	-1	100	250	2	20
24	-1	1	-1	1	60	250	2	40
25	0	0	0	0	80	200	2,5	30
26	0	+α	0	0	80	300	2,5	30
27	0	-α	0	0	80	100	2,5	30
28	1	-1	-1	1	100	150	2	40
29	-1	1	1	-1	60	250	3	20
30	-α	0	0	0	40	200	2,5	30

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarım matrisine uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen konsantrelere ait altın tenör ve verimleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Verim ve tenor değerlerinin tasarım matrisinde gösterimi

Deney	G Kuvveti	Besleme Hızı	Yıkama Suyu	Katı Miktarı	Konsantre	Verim
	A	B	C	D	(g/t)	(%)
1	80	200	2,5	30	42,81	71,99
2	60	150	2	20	40,92	64,13
3	80	200	2,5	30	37,08	71,66
4	80	200	2,5	10	40,27	72,76
5	120	200	2,5	30	27,07	70,87
6	80	200	2,5	30	31,43	73,37
7	80	200	3,5	30	44,29	70,91
8	80	200	2,5	30	31,27	72,28
9	80	200	2,5	50	33,9	71,4
10	100	150	2	20	17,88	76,64
11	60	150	2	40	38,12	73,7
12	100	250	3	40	43,02	71,92
13	80	200	2,5	30	38,88	70,66
14	100	150	3	40	39,1	72,6
15	100	250	2	40	29,24	73,51
16	60	250	3	40	44,44	70,84
17	60	150	3	40	43,57	71,47
18	80	200	1,5	30	28,74	75,46
19	60	150	3	20	40,83	71,83
20	100	250	3	20	40,33	72,52
21	60	250	2	20	41,91	73,24
22	100	150	3	20	41,01	72,86
23	100	250	2	20	33,94	76,87
24	60	250	2	40	38,6	71,24
25	80	200	2,5	30	39,07	73,09
26	80	300	2,5	30	41,83	72,54
27	80	100	2,5	30	32,71	75,39
28	100	150	2	40	18,66	75,9
29	60	250	3	20	44,17	69,25
30	40	200	2,5	30	40,81	69,77

Çizelge 6.2'de tenör için oluşturulan ANOVA tablosu verilmiştir. Kübik model üzerinden yapılan hesaplamalara göre istatistiksel olarak modele katkı sunmayan ($p > 0,1$) ifadeler modelden çıkarılarak tenöre ait model denklemi oluşturulmuştur. Modele ait denklemler kodlanmış ve gerçek değerleri için sırasıyla Eşitlik 6.1 ve Eşitlik 6.2'de verilmiştir. Oluşturulan model istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0,0001$) olup, modelin R^2

değeri 0,8762 olarak hesaplanmıştır. Artık p değerinin (0,989) 0,1'den büyük olması deneysel hatanın istatistiksel olarak anlamsız olduğunu ifade etmektedir. Modele göre tenör değeri üzerindeki etkisi anlamlı olan faktörler A, B, C, AB, AC, BC ve ABC olarak belirlenmiştir. G kuvveti (A), besleme hızı (B), yıkama suyu (C) parametreleri, bu parametrelerin ikili ve üçlü etkileşimleri tenör değerinde anlamlı bir etkiye sahipken, katı oranı (D) etkisi ihmal edilebilirdir. Faktörlerin tenör üzerindeki etkilerinin büyüklükleri C>A>AC>B>ABC>AB>BC şeklinde sıralanmaktadır. Buna göre, yıkama suyu tenör üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametre olurken, G kuvveti ve yıkama suyu parametrelerinin etkileşimi, tenör üzerinde besleme hızının etkisinden daha büyük etkiye sahiptir.

Çizelge 6.2. Tenöre ait ANOVA tablosu

	KT	**sd**	**KO**	**F Değeri**	**p Değeri**
Model	1273,99	7	182	22,25	< 0,0001
A	390,91	1	390,91	47,8	< 0,0001
B	130,39	1	130,39	15,94	0,0006
C	488,7	1	488,7	59,76	< 0.0001
AB	36,6	1	36,6	4,48	0,0459
AC	158	1	158	19,32	0,0002
BC	26,68	1	26,68	3,26	0,0846
ABC	42,71	1	42,71	5,22	0,0323
Artık	179,93	22	8,18		
Uyumsuzluk	80,11	17	4,71	0,24	0,989
Hata	99,82	5	19,96		
Toplam	1453,92	29			
					R^2 = 0,8762

$$R_1(\text{Tenör}) = 36{,}77433333 - 4{,}035833333 * A + 2{,}330833333 * B + 4{,}5125 * C + 1{,}5125 * A * B + 3{,}1425 * A * C - 1{,}29125 * B * C - 1{,}63375 * A * B * C \quad (6.1)$$

$$R_1\,(\text{Tenör}) = 212{,}9568333 - 2{,}923666667 * A - 0{,}598758333 * B - 58{,}065 * C + 0{,}00968125 * A * B + 0{,}96775 * A * C + 0{,}20975 * B * C - 0{,}0032675 * A * B * C \quad (6.2)$$

Çizelge 6.3'de verim için oluşturulan ANOVA tablosu verilmiştir. Kübik model üzerinden yapılan hesaplamalara göre istatistiksel olarak modele katkı sunmayan (p > 0,1) ifadeler modelden çıkarılarak verime ait model denklemi oluşturulmuştur. Modele ait denklemler kodlanmış ve gerçek değerleri için sırasıyla Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4'de verilmiştir. Oluşturulan model istatistiksel olarak anlamlı (p = 0,002) olup, modelin R^2 değeri 0,8685 olarak hesaplanmıştır. Artık p değerinin (0,1487) 0,1'den büyük olması

deneysel hatanın istatistiksel olarak anlamsız olduğunu göstermektedir. Modele göre verim değeri üzerindeki etkisi anlamlı olan faktörler A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, A^2, B^2, ABC, ACD, BCD ve AB^2 olarak belirlenmiştir. Varyans analizine göre tüm faktörler verim üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. İlave olarak varyans analizi faktörlerin ikili ve üçlü etkileşimlerinin yanı sıra, G kuvveti (A) ve besleme hızı (B) parametrelerinin verim üzerinde ikinci dereceden etkiye sahip olduğunu da göstermektedir. Faktörlerin verim üzerindeki etkileri büyüklük bakımından C>BCD>AC>AD>AB^2>BD>ABC> ACD>A^2>BC>B^2>AB>A>CD>B>D şeklinde sıralanmaktadır.

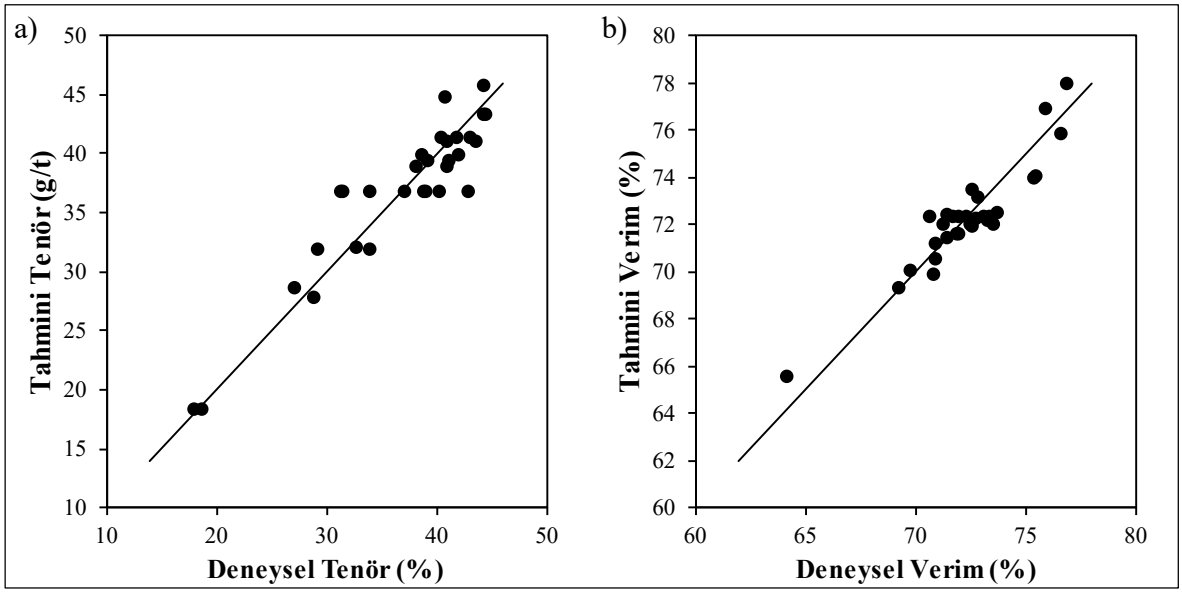
Çizelge 6.3. Verime ait ANOVA tablosu

	KT	**sd**	**KO**	**F Değeri**	**p Değeri**
Model	146,141764	16	9,13386027	5,36730523	0,0020
A	0,61145778	1	0,61145778	0,35930925	0,5592
B	0,39469742	1	0,39469742	0,23193496	0,6381
C	18,44946	1	18,44946	10,8414055	0,0058
D	0,05107314	1	0,05107314	0,03001197	0,8651
AB	2,72691138	1	2,72691138	1,60240745	0,2278
AC	12,4044726	1	12,4044726	7,28920619	0,0182
AD	11,837883	1	11,837883	6,95626266	0,0205
BC	4,76150396	1	4,76150396	2,7979895	0,1183
BD	9,88812748	1	9,88812748	5,8105332	0,0315
CD	0,60344605	1	0,60344605	0,35460135	0,5617
A^2	4,93699449	1	4,93699449	2,90111252	0,1123
B^2	3,45464	1	3,45464	2,03004062	0,1778
ABC	7,58774192	1	7,58774192	4,45876395	0,0547
ACD	5,7494265	1	5,7494265	3,37851971	0,0890
BCD	15,6364698	1	15,6364698	9,1884158	0,0096
AB^2	10,7445136	1	10,7445136	6,31376901	0,0260
Artık	22,1228677	13	1,70175905		
Uyumsuzluk	17,9050816	8	2,2381352	2,65321091	0,1487
Hata	4,21778606	5	0,84355721		
Toplam	168,264632	29			
					R^2 = 0,8685

$$R_2\,(\text{Verim}) = 72{,}31214181 + 0{,}27646378 * A - 0{,}12824089 * B - 0{,}876771064 * C + 0{,}046130764 * D - 0{,}41283406 * A * B - 0{,}880499596 * A * C - 0{,}860155617 * A * D - 0{,}545521766 * B * C - 0{,}786134828 * B * D - 0{,}194204475 * C * D - 0{,}416612785 * A^2 + 0{,}34849991 * B^2 + 0{,}688646404 * A * B * C + 0{,}599449044 * A * C * D + 0{,}988574408 * B * C * D + 1{,}419364751 * A * B^2 \quad (6.3)$$

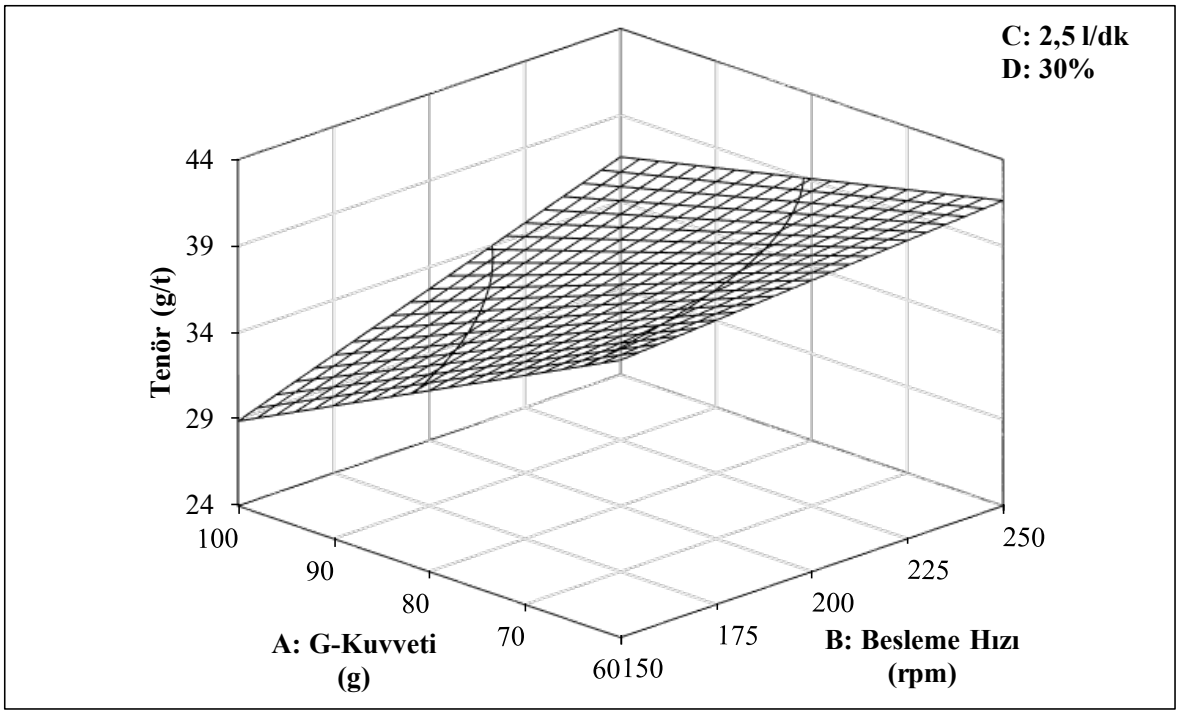
$$R_2\ (\text{Verim}) = -224.1318809 + 2.885908344 * A + 1.55684651 * B + 70.9691034 * C + 3.936278396 * D - 0.015210984 * A * B - 0.543343235 * A * C - 0.019287004 * A * D - 0.250633224 * B * C - 0.011458014 * B * D - 1.309259657 * C * D - 0.001041532 * A^2 - 0.002131584 * B^2 + 0.00137729 * A * B * C + 0.0059945 * A * C * D + 0.003954298 * B * C * D + 2.83873E-05 * A * B^2 \quad (6.4)$$

Analiz sonucunda oluşturulan modeller ile tahmin edilen değerler ve bu değerlerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel ve model tahmini verilerin karşılaştırılması a) Tenör b) Verim

Şekil 6.2'de G kuvveti ve besleme hızının altın tenörü ve verimi üzerindeki etkisi ve bu iki parametrenin birbiriyle olan etkileşimleri 2,5 l/dk yıkama suyu ve 30% katı oranı için gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere G kuvvetindeki artış tenörü azaltırken, besleme hızındaki artış tenörü arttırmaktadır. Ancak, G kuvvetinin yüksek olduğu durumda, besleme hızının tenör üzerindeki etkisi daha belirginken, G kuvveti düştükçe besleme hızının tenör üzerindeki etkisi azalmaktadır. Benzer olarak G kuvvetinin tenör üzerindeki etkisi düşük besleme hızında daha belirginken, besleme hızının artmasıyla G kuvvetindeki değişimin tenör üzerindeki etkisi de azalmaktadır. En düşük altın tenörü, 28,9 g/t ile, yıkama suyunun 2,5 l/dk ve katı oranın 30% olduğu durumda, 100G ve 150 rpm besleme hızında elde edilirken, en yüksek tenör, 60 G ve 250 rpm besleme hızında, 41,6 g/t olarak elde edilmiştir.

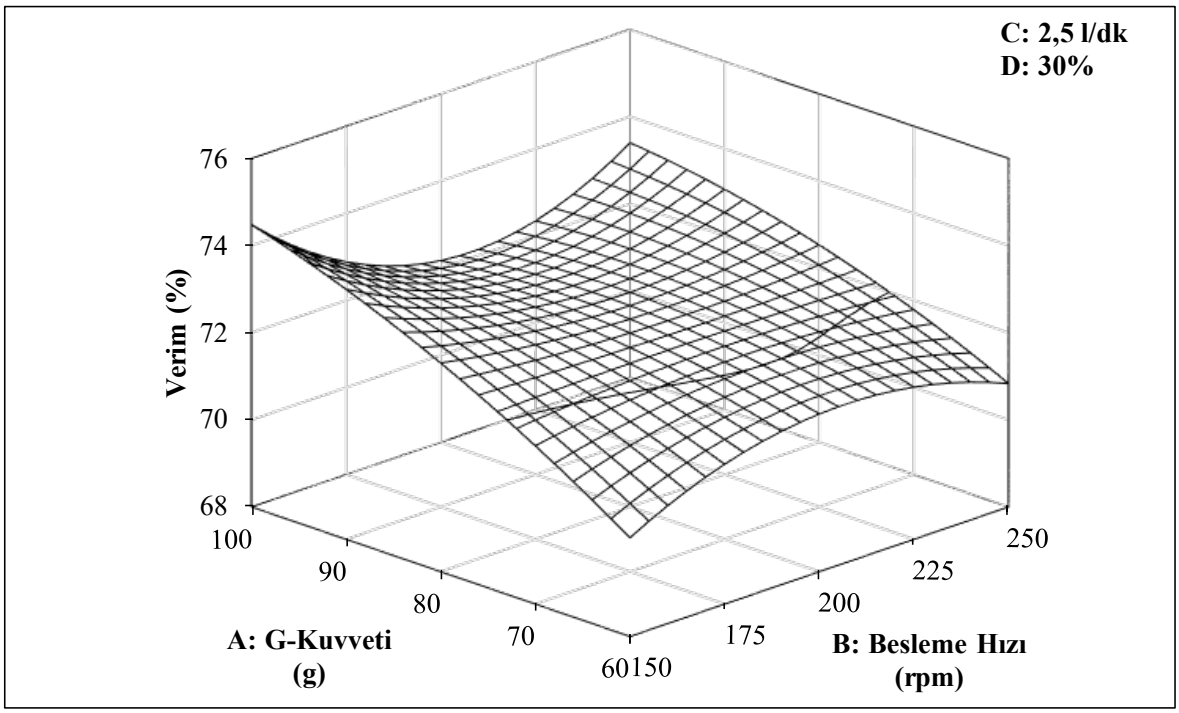


Şekil 6.2. G kuvveti ve besleme hızının altın tenörü üzerindeki etkisi

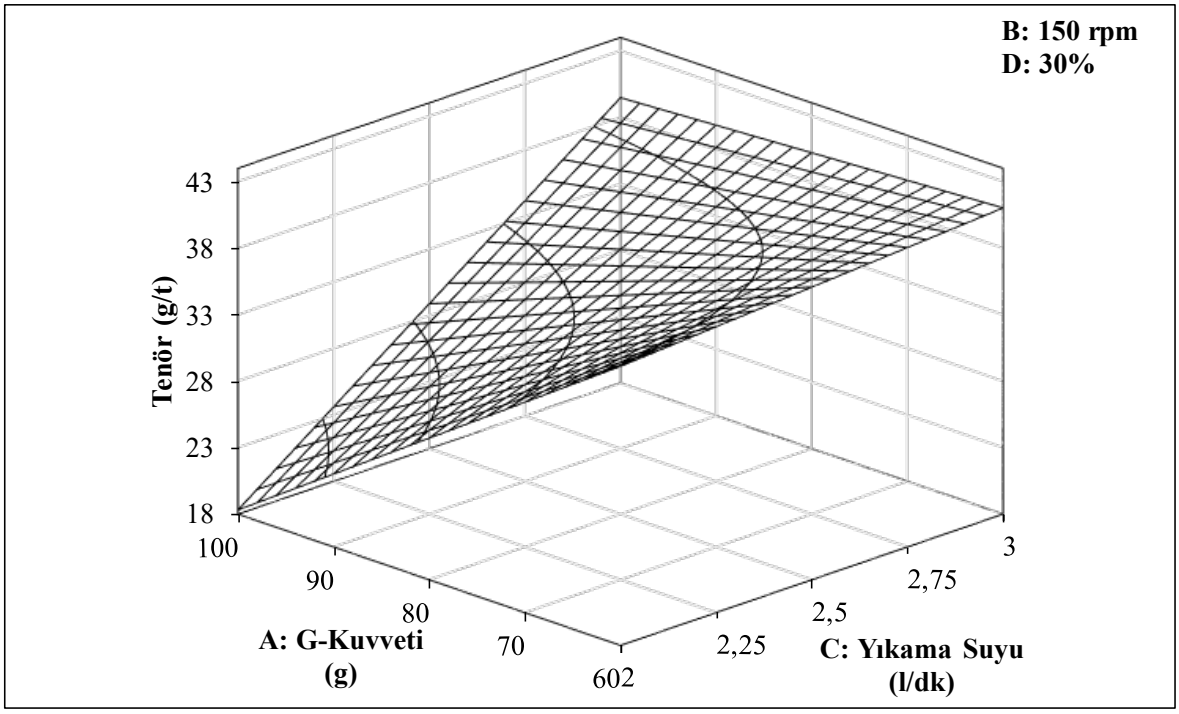
G kuvveti ve besleme hızının altın verimi üzerindeki etkisi ve birbirleriyle olan etkileşimleri Şekil 6.3'de, 2,5 l/dk yıkama suyu ve %30 katı oranı için gösterilmiştir. Altın verimi G kuvvetindeki artışla birlikte düşerken, besleme hızının verim üzerinde daha karmaşık bir etkisi olduğunu ve bu etkinin G kuvvetine göre de değişkenlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Şekilden de görüleceği üzere, düşük G kuvvetinde besleme hızındaki artış altın verimini önce arttırmakta, daha sonra ise verimin düşmesine neden olmaktadır. Ancak, yüksek G kuvveti seviyesinde, besleme hızındaki artış altın verimini önce düşürürken, daha sonra artmasına neden olmaktadır. Yıkama suyunun 2,5 l/dk ve katı oranının %30 olduğu şartta, en düşük altın verimi, 150 rpm besleme hızı ve 60 G kuvvetinde %70,3'tür. En yüksek altın verimi ise, 150 rpm besleme hızında ve 100 G kuvvetinde %74,5 olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.4'de G kuvveti ve yıkama suyunun altın tenörü üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi 150 rpm besleme hızı ve %30 katı oranı şartlarında görülmektedir. G kuvvetinin düşük seviyesinde olduğu şartta, yıkama suyu miktarındaki değişim, altın tenöründe kayda değer bir değişiklik yaratmamıştır. G kuvvetindeki artışla birlikte altın tenörü düşerken, G kuvvetinin yıkama suyu ile birlikte arttırılması altın tenörünün artmasını sağlamaktadır. Besleme hızının 150 rpm katı oranının

30% olduğu durumda, en düşük altın tenörü, 18,3 g/t ile, 100 G ve 2 lt/dk yıkama suyu seviyesinde elde edilmiştir. En yüksek altın tenörü ise, 41,0 g/t ile, G kuvvetinin en düşük (60 G), yıkama suyunun en yüksek (3 lt/dk) seviyesinde elde edilmektedir.

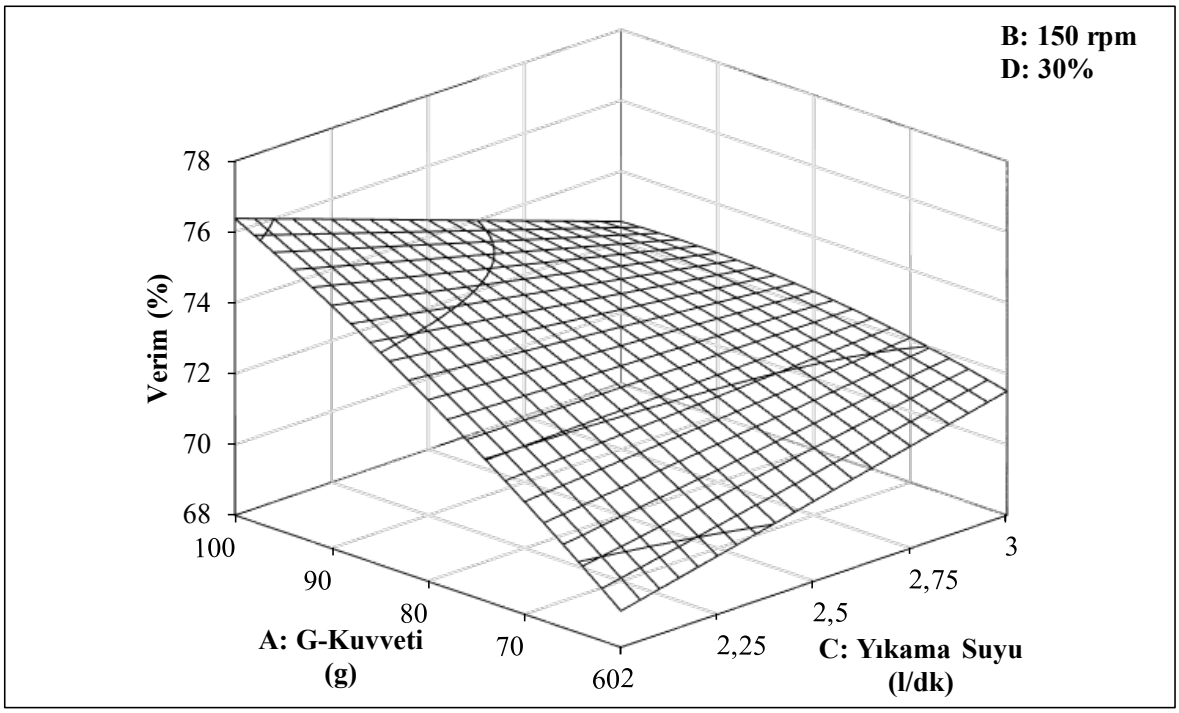


Şekil 6.3. G kuvveti ve besleme hızının altın verimi üzerindeki etkisi



Şekil 6.4. G kuvveti ve yıkama suyunun altın tenörü üzerindeki etkisi

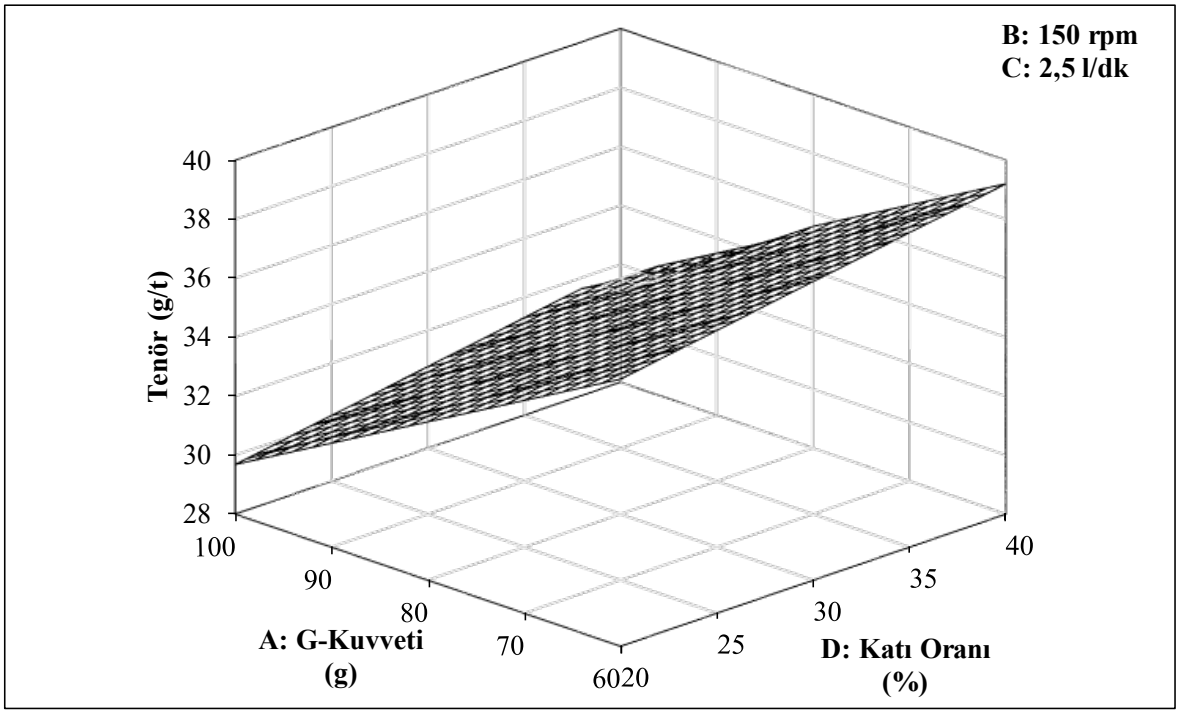
G kuvveti ve yıkama suyunun verim üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi, 150 rpm besleme hızı ve %30 katı oranı için, Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, G kuvvetinin artması altın verimini arttırmaktadır. Ancak, G kuvvetinin altın verimi üzerindeki etkisi, yıkama suyu miktarına göre değişkenlik göstermektedir. G kuvvetin düşük seviyesinde, yıkama suyu miktarının artması, altın verimini arttırırken, yüksek G kuvvetinde, yıkama suyu verimi düşürmektedir. G kuvvetinin verim üzerindeki etkisi, düşük yıkama suyu miktarlarında daha belirginken, yıkama suyunun artmasıyla, G kuvvetinin verim üzerindeki etkisi sınırlanmaktadır. Besleme hızının 150 rpm, katı oranının %30 olduğu durumda, en düşük altın verimi, %69,0 ile, 60 G ve 2 l/dk yıkama suyu seviyesinde elde edilmiştir. En yüksek altın verimi ise, %76,4 ile, 100 G ve 2 l/dk yıkama suyu seviyesinde elde edilmiştir.



Şekil 6.5. G kuvveti ve yıkama suyunun altın verimi üzerindeki etkisi

Şekil 6.6'de G kuvveti ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi ve iki parametrenin birbiriyle olan ilişkisi, 150 rpm besleme hızında ve 2,5 l/dk yıkama suyu için gösterilmiştir. G kuvvetinin artmasıyla, altın tenörü belirgin olarak azalırken, katı oranındaki artış, sınırlı da olsa tersi bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle, G kuvvetindeki değişimin altın tenörü üzerindeki etkisinin, katı oranına kıyasla daha belirgin olduğunu söylemek mümkündür. 150 rpm besleme hızı ve 2,5 l/dk yıkama suyu için, en düşük altın tenörü, 100

G'de ve %40 katı oranında, 28,1 g/t olarak elde edilirken, en yüksek altın tenörü ise, 60 G ve %20 katı oranında, 40,6 g/t olarak elde edilmiştir.

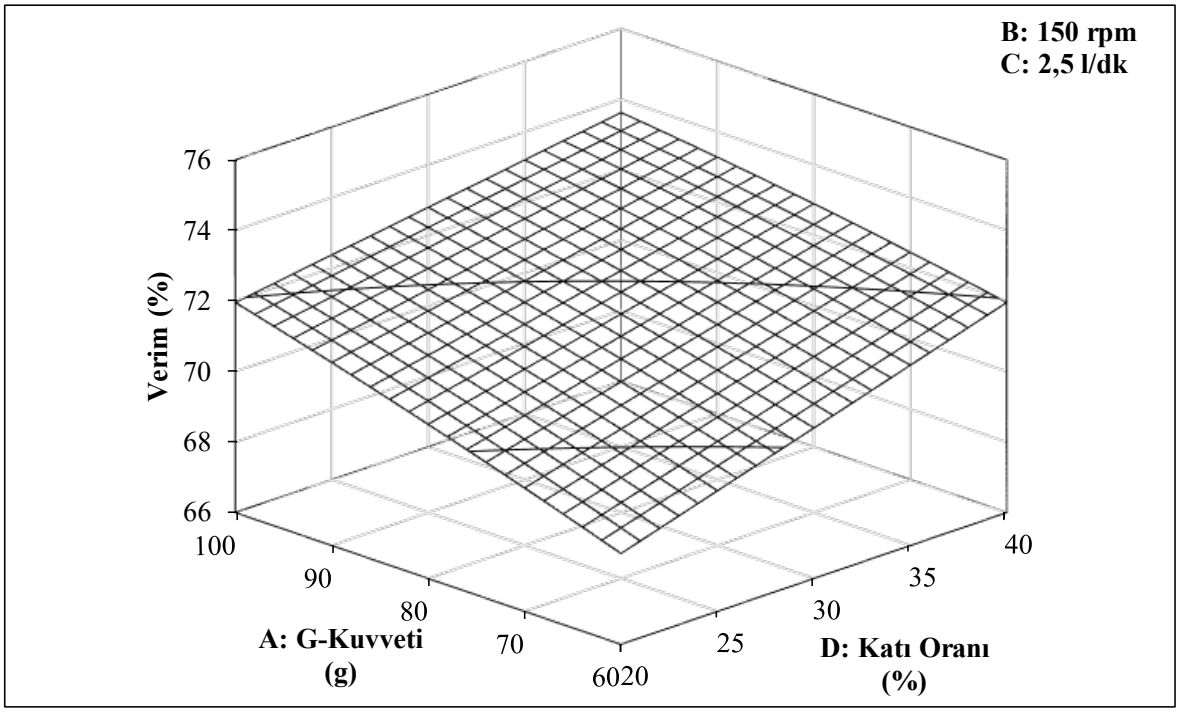


Şekil 6.6. G kuvveti ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi

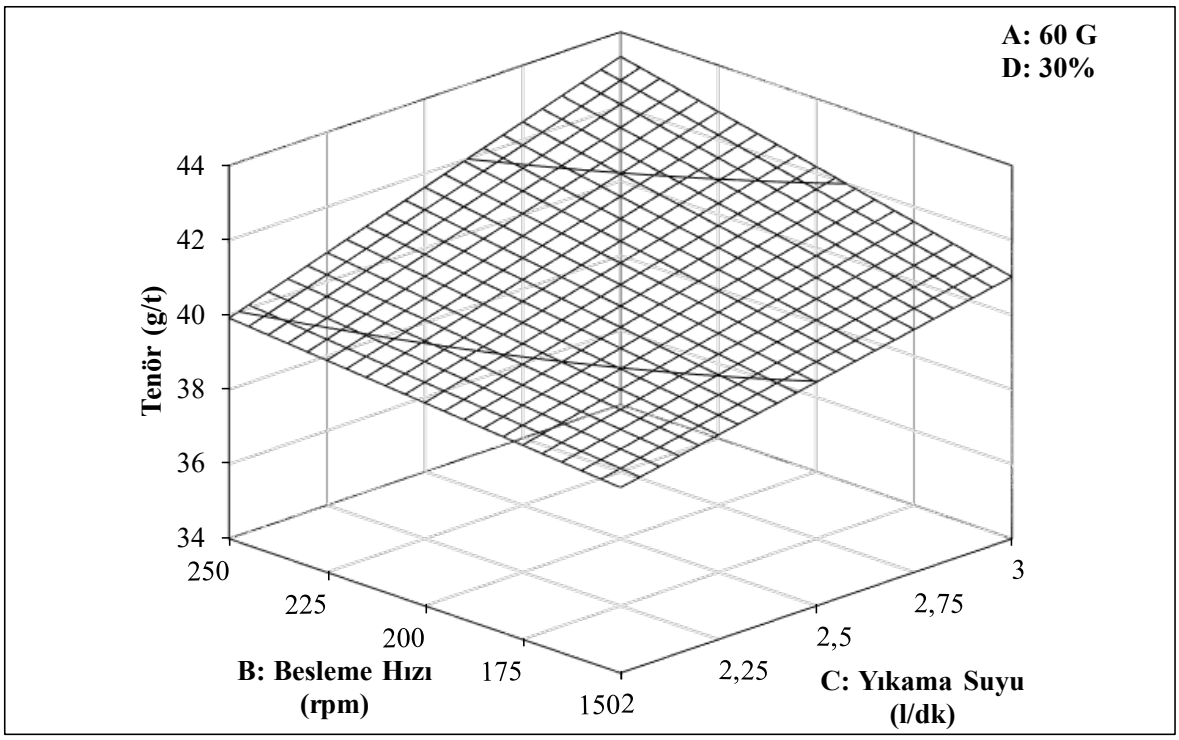
G kuvveti ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi 150 rpm besleme hızı ve 2,5 l/dk yıkama suyu için Şekil 6.7'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, hem G kuvvetinin hem de katı oranın artması altın verimini arttırmaktadır, ancak parametrelerin önemli bir etkileşim göstermediğini söylemek mümkündür. G kuvveti ve katı oranı etkisinde, 150 rpm besleme hızı ve 2,5 l/dk yıkama suyu seviyesinde, en düşük altın verimi, 60 G ve %20 katı oranında, %73,6 iken, en yüksek altın verimi ise 100 G ve %40 katı oranında, %73,6 olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.8'te, besleme hızı ve yıkama suyu miktarının altın tenörü üzerindeki etkisi ve iki parametrenin birbiriyle olan ilişkisi, 60 G ve %30 katı oranı şartında gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, besleme hızı ve yıkama suyu miktarı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Yıkama suyu ve besleme hızının birlikte arttırılması, altın tenörünü arttırırken, iki parametrenin birlikte azaltılması, tenörü düşürmektedir. En düşük altın tenörü, 60 G ve %30 katı oranı için, 150 rpm besleme hızı ve 2 l/dk ve yıkama suyu seviyesinde, 39,0 g/t

olarak elde edilmiştir. En yüksek altın tenörü ise 43,3 g/t ile, iki parametrenin yüksek seviyeleri olan 250 rpm ve 3 l/dk seviyelerinde elde edilmiştir.

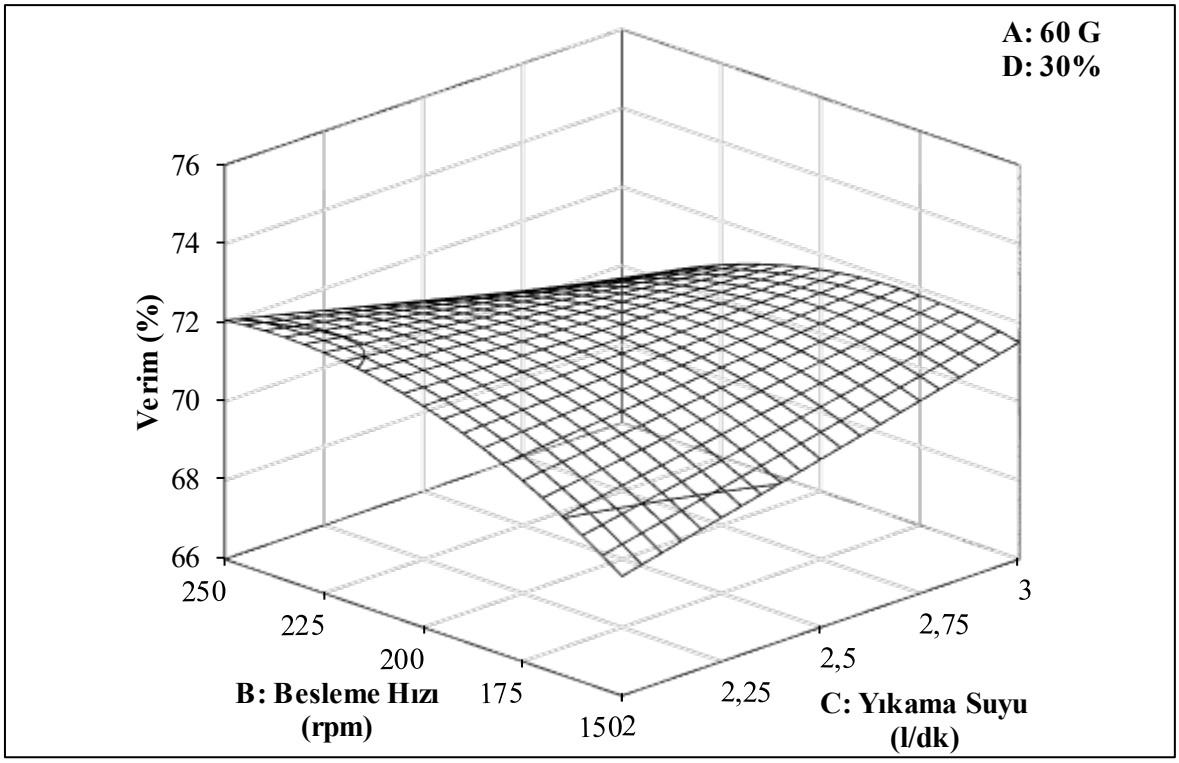


Şekil 6.7. G kuvveti ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi



Şekil 6.8. Besleme hızı ve yıkama suyunun altın tenörü üzerindeki etkisi

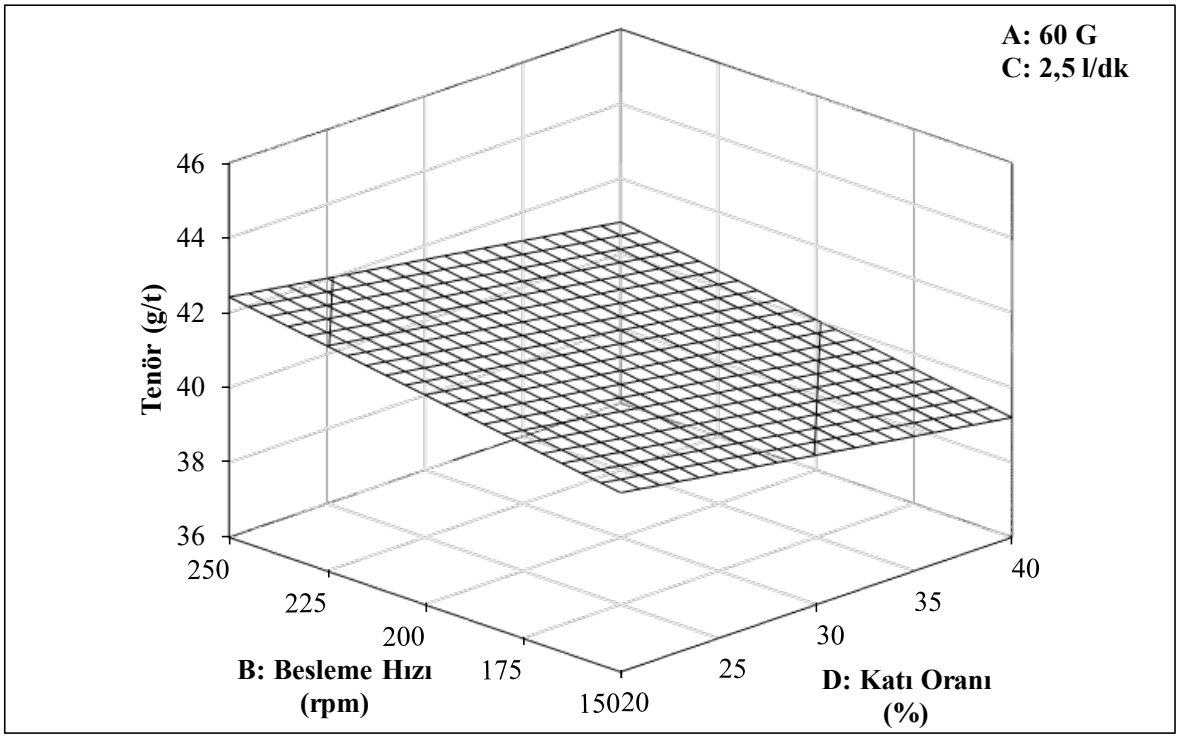
Besleme hızı ve yıkama suyu miktarının altın verimi üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi, 60 G ve %30 katı oranı için, Şekil 6.9'de gösterilmiştir. Besleme hızındaki artış, yıkama suyunun düşük olduğu seviyelerde altın verimini arttırırken, besleme hızının 200 rpm üzerindeki seviyelerinde bu etki ortadan kalkmaktadır. Benzer olarak, yıkama suyundaki artış da, besleme hızının düşük olduğu seviyede altın verimini arttırırken, besleme hızının yüksek seviyeleri tercih edildiğinde yıkama suyundaki artış verimde düşüşe neden olmaktadır. Besleme hızı ve yıkama suyunun etkisinde, 60 G ve %30 katı oranı için, en düşük altın verimi, %69.0 ile, 150 rpm ve 2 l/dk seviyelerinde elde edilmiştir. En yüksek altın verimi ise besleme hızının 160-185 rpm aralığında olduğu durumda, 3 l/dk yıkama suyu seviyesinde, %71,8 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.9. Besleme hızının ve yıkama suyunun altın verimi üzerindeki etkisi

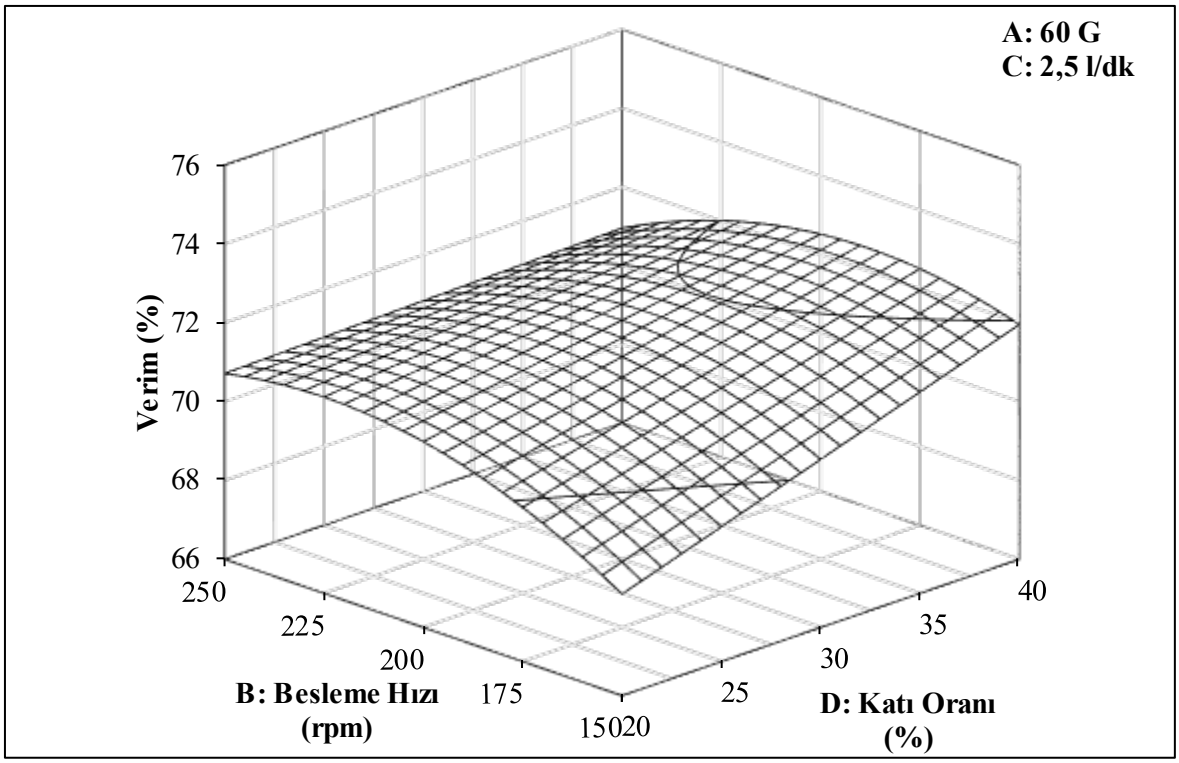
Şekil 6.10'da, besleme hızı ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi, 60 G ve 2,5 l/dk yıkama suyu için gösterilmiştir. Besleme hızının artışı, altın tenörünü az da olsa arttırırken, katı oranın artışı, tenörü düşürmektedir. Besleme hızı ve katı oranının birbirleriyle olan etkileşimi sınırlıdır. 60G ve 2,5 l/dk yıkama suyu için, en düşük altın tenörü, 150 rpm besleme hızı ve %40 katı oranında,

39,2 g/t olarak, en yüksek altın tenörü ise, 250 rpm besleme hızı ve %20 katı oranında, 42,4 g/t olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.10. Besleme hızının ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi

Besleme hızı ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi, 60 G ve 2,5 l/dk yıkama suyu için, Şekil 6.11'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, besleme hızındaki artış, katı oranına bağlı olarak altın verimini 200 rpm besleme hızlarına kadar arttırmış daha sonra ise bir miktar azaltmıştır. Katı oranının etkisinin ise besleme hızına göre değişkenlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Besleme hızının en düşük olduğu seviyede katı oranındaki artış, altın verimini arttırıcı bir etki gösterirken, besleme hızının artmasıyla, katı oranının verim üzerindeki etkisi sınırlı hale gelmektedir. Besleme hızı ve katı oranı etkisinde, 60 G ve 2,5 l/t yıkama suyu miktarı için, en düşük altın verimi, %68,6 olarak, 150 rpm besleme hızı ve %20 katı oranında elde edilmiştir. En yüksek altın verimi ise, besleme hızının orta noktalarına yakın olan 180-195 rpm seviyelerinde, %40 katı oranında, %72,6 olarak elde edilmiştir.

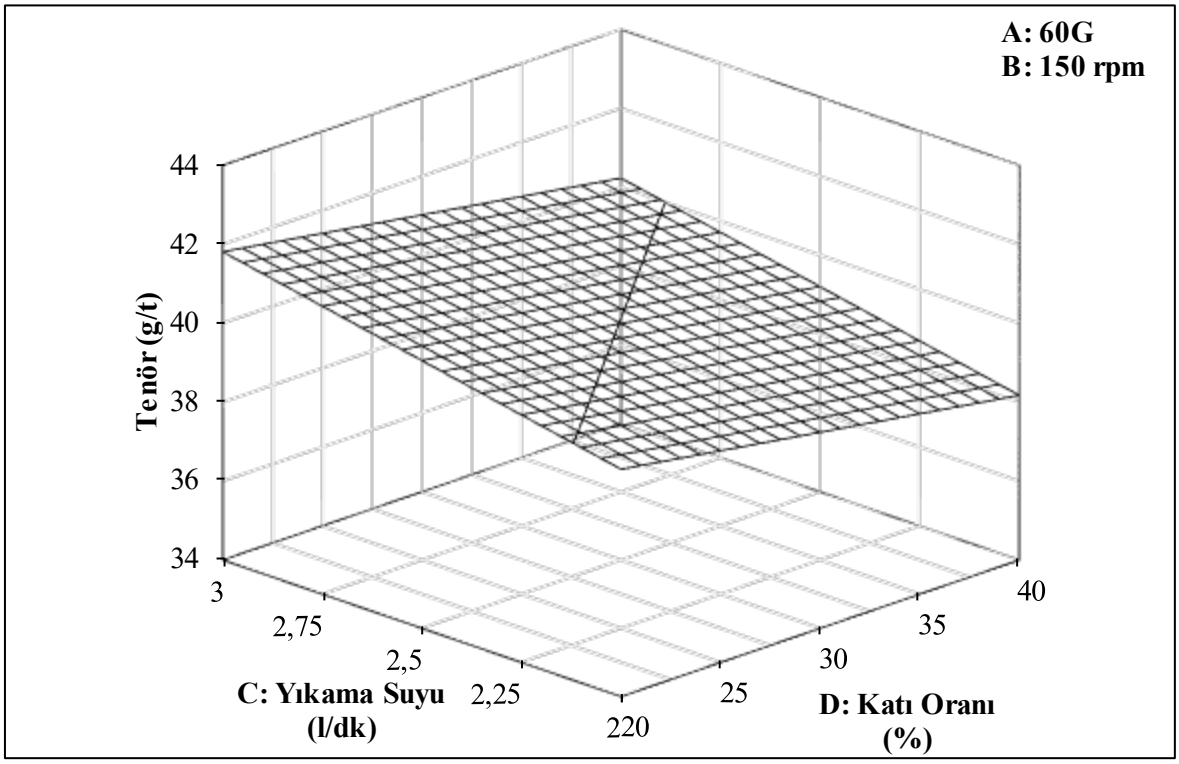


Şekil 6.11. Besleme hızı ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkisi

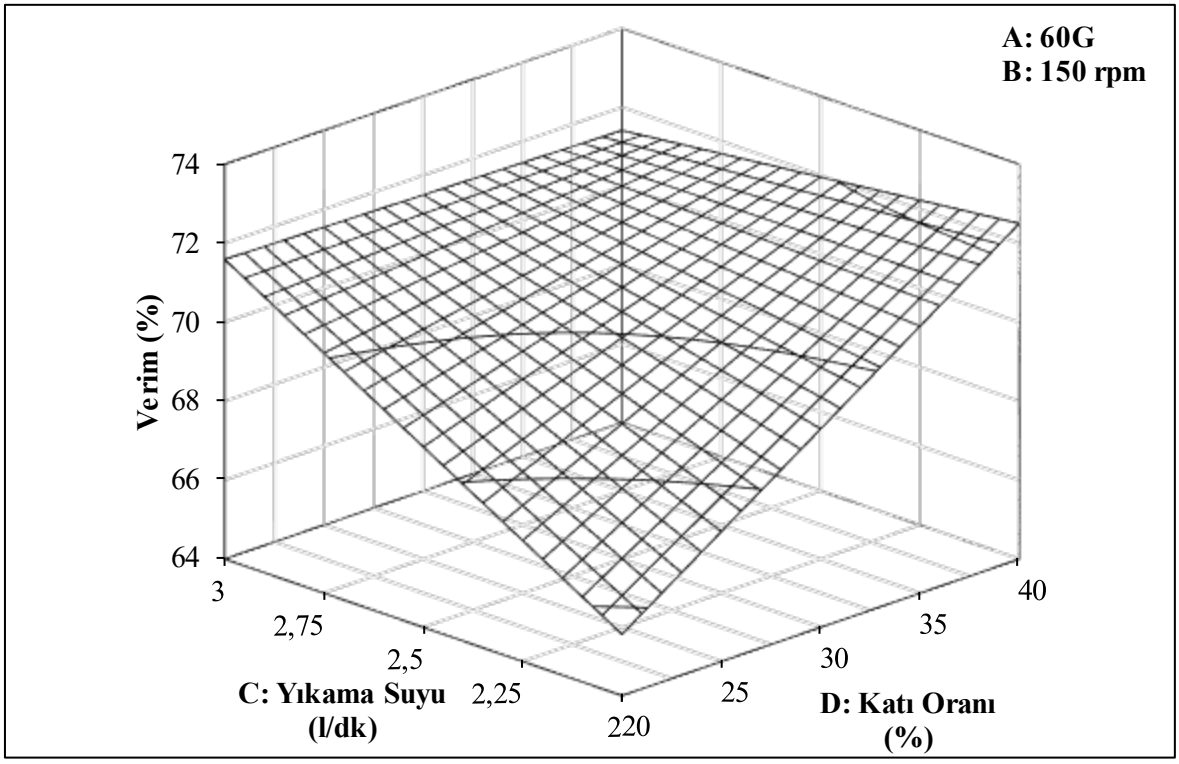
Şekil 6.12'de, yıkama suyu ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri, 60 G ve 150 rpm besleme hızı için gösterilmiştir. Yıkama suyu miktarındaki artış, altın tenörünü arttırırken, katı oranındaki artış ise, tenörü azaltmaktadır. Parametrelerin farklı seviyelerinin, tenör üzerindeki etkilerinde anlamlı bir farklılık olmadığını söylemek mümkündür. Yıkama suyu ve katı oranı etkisinde, 60 G ve 150 rpm besleme hızında en düşük altın tenörü 2 l/dk besleme hızı ve %40 katı oranında 38,2 g/t olarak elde edilmiştir. En yüksek altın tenörü ise 41,8 g/t ile 3 l/dk yıkama suyu ve %20 katı oranında elde edilmiştir.

Yıkama suyu ve katı oranının altın verimi üzerindeki etkileri ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri, Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Yıkama suyu miktarının arttırılması, düşük katı oranı seviyelerinde verimi arttırırken, katı oranının artmasıyla birlikte bu etki azalmakta, en yüksek katı oranı seviyesi olan %40'da ise ortadan kalkmaktadır. Benzer bir yorumu, katı oranı için de yapmak mümkündür. Düşük yıkama suyu seviyesinde, katı oranının artması, altın verimini arttırırken, yıkama suyunun artışıyla birlikte verimdeki artış azalmakta, en yüksek yıkama suyu seviyesi olan 3 l/dk'da ise ortadan kalkmaktadır. Yıkama suyu ve katı oranı etkisinde, 60 G ve 150 rpm besleme hızı için, en düşük altın

verimi, %65,6 ile, 2 l/dk yıkama suyu ve %20 katı oranında, en yüksek altın verimi ise %72,5 ile, 2 lt/dk yıkama suyu ve %40 katı oranında elde edilmiştir.

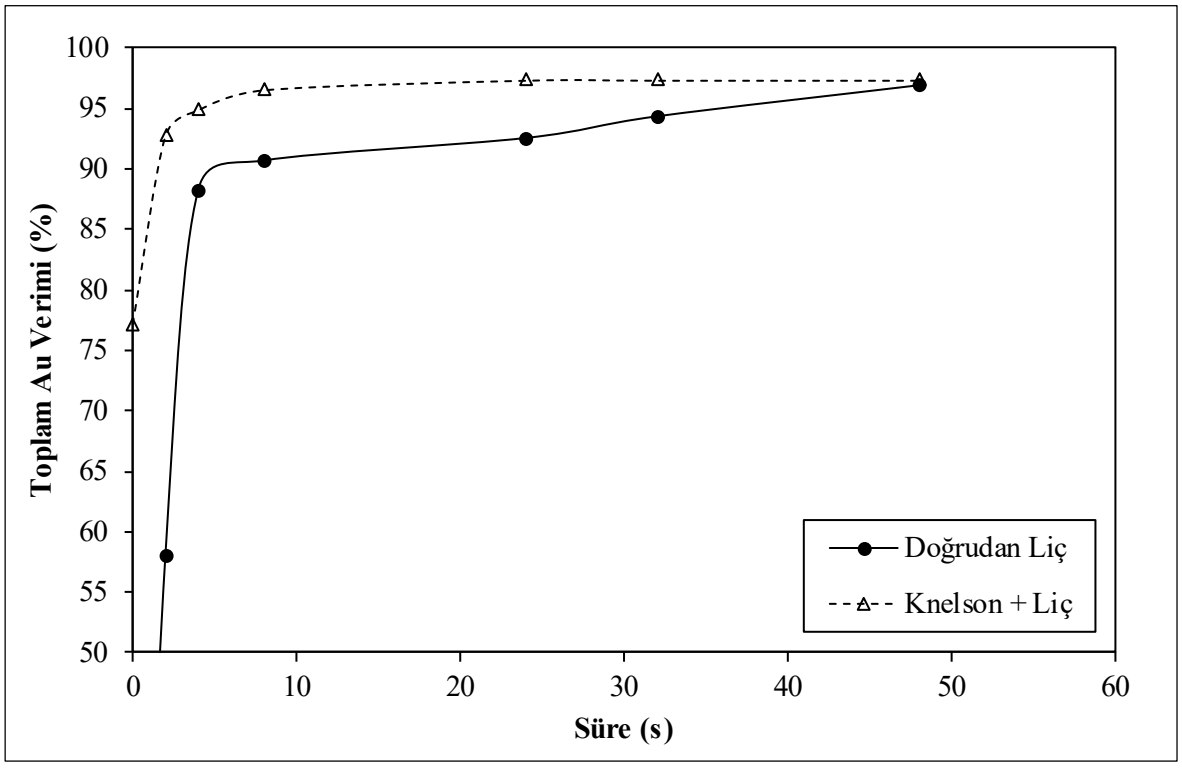


Şekil 6.12. Yıkama suyu ve katı oranının altın tenörü üzerindeki etkisi



Şekil 6.13. Yıkama suyu ve katı oranının verim üzerindeki etkisi

Knelson ayırıcısı ile gerçekleştirilen testlerde en yüksek tenöre 60 G, 250 rpm, 3 l/dk ve %40 katı oranı şartlarında ulaşılmıştır. Bu koşullar altında, %70,8'lik verim ile 44.4 g/t Au tenörüne sahip bir konsantre elde edilmiştir. Bu koşullarda elde edilen artığa BRT uygulanarak, liç verimleri doğrudan ve Knelson ayırıcısı sonrası karşılaştırmalı olarak Şekil 6.14'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, 48 saatlik liç süresi sonucunda her iki durumda Au verimleri yaklaşık %98 ile oldukça benzerdir. Bununla birlikte, Knelson ayırıcısı sonrasında gerçekleştirilen liç ile en yüksek Au verimine yaklaşık 10 saatte ulaşılırken, doğrudan liçte bu süre yaklaşık 48 saattir. Bu da, liçten önce gerçekleştirilen Knelson zenginleştirmesi ile liç süresinin önemli ölçüde kısaltıldığını göstermektedir. Ayrıca, doğrudan liç uygulamasında siyanür tüketimi 0,76 kg/mt olurken, Knelson ayırıcısı sonrasında uygulanan liç işleminde 0,50 kg/mt olmuştur.



Şekil 6.14. Doğrudan liç ve Knelson ayırıcısı sonrası liçin zamana bağlı Au verimleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Knelson ayırıcısının çalışma parametrelerinin altın zenginleştirme üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan cevher 4,57 g/t Au içeriğine sahip oksitli bir altın cevheri olarak tanımlanmaktadır. Yapılan kimyasal ve mineralojik analizler, cevherde altının önemli oranda serbest halde bulunduğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında etkisi incelenen parametreler; G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranıdır. Deneysel çalışmalar, deney tasarımı yöntemleri kullanılarak planlanmıştır. Deneylerin planlanmasında, mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan Merkezi Kompozit Dizayn kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ait sonuçların değerlendirilmesi, elde edilen konsantrelerin altın tenörü ve verimi kullanılarak istatistiksel olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel verilerin yardımıyla G kuvveti, yıkama suyu, besleme hızı ve katı oranı parametrelerinin altın tenörü ve verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyan modeller oluşturulmuştur. Ayrıca parametrelerin etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri ANOVA verileri ve yüzey cevap grafikleri ile tartışılmıştır. Çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, tenörün öncelendiği durumda, 44,4 g/t Au içeren bir konsantre, %70,8 verimle, 60 G kuvvetinde, 250 rpm besleme hızında, 3 l/dk yıkama suyu debisinde ve %40 katı oranında elde edilmiştir. Verimin öncelendiği durumda ise, 33,9 g/t Au içeren bir konsantre, %76,8 verimle, 100 G kuvvetinde, 250 rpm besleme hızında, 2 l/dk yıkama suyu debisinde ve %20 katı oranında elde edilmiştir.

- Deney sonuçları ile gerçekleştirilen ANOVA analizleri sonucunda tenör ve verim için modeller oluşturulmuştur. Tenör için oluşturulan model, 0,8762 R^2 değeri ile verim için oluşturulan model ise, 0,8685 R^2 değeri ile istatistiksel olarak anlamlıdır. Oluşturulan bu modeller ile tahmin edilen tenör ve verim değerleri, deneysel verilerle yüksek bir uyum içindedir.

- Knelson ayırıcısının G kuvveti, besleme hızı ve yıkama suyu parametrelerinin tenör üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu, buna karşılık katı oranının tenör üzerindeki

etkisinin ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir. Tenör üzerindeki etkisi en yüksek olan parametreler, yıkama suyu ve G kuvvetidir. Ayrıca parametreler, tenör üzerinde ikili ve üçlü etkileşimler göstermektedir. Öyle ki, G kuvveti ve yıkama suyu parametrelerinin tenör üzerindeki etkisi, besleme hızının etkisinden daha önemlidir. Örneğin, G kuvvetindeki artış, genel olarak altın tenörünü düşürürken, yıkama suyunun arttırılması, G kuvvetinin bu etkisini belirgin olarak azaltmaktadır.

- Parametrelerin altın verimi üzerindeki etkisi, tenör üzerindeki etkilerine kıyasla çok daha karmaşıktır. Altın verimini en çok etkileyen parametre, yıkama suyudur, ancak verimin parametreler arasındaki ikili ve üçlü etkileşimlerden, parametrelerin tekil etkilerine kıyasla daha fazla etkilendiğini söylemek mümkündür. Örneğin, katı oranı ve besleme hızının tekil etkileri, G kuvvetinden düşük olmasına karşın, bu parametrelerin ikili etkileşimi, altın verimini G kuvvetinden çok daha fazla etkilemektedir. Bir başka örnek olarak, besleme hızının, düşük yıkama suyu seviyelerinde, verimi arttırıcı bir etkisi bulunurken, yıkama suyunun yüksek seviyelerinde, besleme hızının artışı, verimi düşürmektedir.

- Cevhere liç öncesinde uygulanan Knelson ayırması ile liç süresinin ve siyanür tüketiminin önemli ölçüde azaldığı anlaşılmaktadır. Ancak, Knelson ayırıcısı ile elde edilen konsantrenin de liç işlemine tabi tutulması gerektiği unutulmamalıdır. Bu durumun da siyanür tüketimini belirli bir ölçüde arttırması kaçınılmazdır. Knelson ayırıcısı ile elde edilen konsantrenin yoğun (intensive) liç ile zenginleştirilmenin en uygun çözüm olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki bilgiler ışığında, yoğun liç işleminin daha yüksek verim, daha düşük kalma süresi, siyanür ve karbon tüketimi ile sonuçlanacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, liç öncesi gerçekleştirilecek Knelson ayırmasının maliyetleri azaltarak, süreçte avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir.

- Deneysel çalışmalarda uygulanan tek seferde bir faktör yaklaşımına karşın, istatistiksel deney tasarımının karmaşık verileri çözümlemede etkili bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. İstatiksel deney tasarımı kullanılarak oluşturulan modellerin, deneysel olarak çalışılmamış noktaları da tahmin yeteneğinin bulunması, bir diğer önemli avantaj olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Adams, M. D., & Wills B. A. (Ed.). (2005), *Advances in Gold Ore Processing*, Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15037-6

Afenya, P. M. (1991). *Treatment of carbonaceous refractory gold ores*. Minerals Engineering, 4(7–11), 1043–1055.

Akçıl, A. (1998). *Recovery of Gold from İzmir-Karşıyaka (Arapdağı) Epitermal Deposit*, [Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]

Akdağ,M., Ekstratif Metalurji, DEÜ Mühendislik Fakültesi Basımevi, İzmir, 1986.

Alp, İ., Celep, O., Deveci, H., Yazıcı, E., (2004). *Processing of Gold from Mastra (Gümüşhane-Turkey) Ore by Knelson Gravity Concentrator.* SGEM Bulgaristan, Bildiriler Kitabı, 259-266.

Anderson, G. (2006). *The design-of-experiment optimization and development of cobaltite ore mineral processing*, JOM, 58, 43-46."

Aslan, N., 2007, Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-Gravity Separator for coal cleaning. Fuel, Vol. 86, pp. 769-776.

Aslan, N., 2007, *Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-Gravity separator for coal cleaning*, Fuel, 86, 769-776."

Baş, C. (2010). *Cevap yüzeyi tasarımları ve sinir ağları yaklaşımı*, [Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi]

Baum, W. (1990). *Mineralogy as a metallurgical tool in refractory gold ore process selection and optimization*. In Randol Gold Forum'90, Squaw Valley Inn (pp. 35-38).

Bulatovic, S.M. (1997). *Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides*, Minerals Engincering, 10(9). 895-908.

Celep, O. (2005). *Mastra ve Kaletaş (Gümüşhane) Cevherinden Altın Kazanımı*. [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]

Chen, T. T., Cabri, L. J., Dutrizac, J. E. (2002). *Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues*. JOM, 54(12), 20–22.

Cho, E. H., Pitt, C. H. (1979). *The adsorption of silver cyanide on activated charcoal*. Metallurgical Transactions B, 10(2), 159–164.

Craig, J., Rimstidt, D. (1998), *Gold production history of the United States*. Ore Geology Reviews, 13(6), 407–464

Croarkin, C., Tobias, P., 2015, *Engineering Statistics e-Handbook*. Erişim Adresi: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/ Erişim Tarihi: 10.01.2023.

Czitrom, V. (1999) *One Factor at a Time Versus Designed Experiments*. American Statistician, Vol. 53, pp. 126-131.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Çilingir, V. (1996). *Metalik Cevherler ve Zenginleştirme Yöntemleri Cilt 1*, DEÜ Mühendislik Fakültesi Basımevi.

Dorr, J. V. N., & Bosqui, F. L. (1950). Cyanidation and concentration of gold and silver ores. McGraw-Hill.

Dunne, R., Buda, K., Hill, M., Staunton, W., Wardell-Johnson, G., Tjandrawan, V. (2012). *Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 121(4), 217–223.

Ekrem E., (2006). *Osmanlı Para Sistemi ve Tağşiş Politikası: Dönemsel Bir Analiz*, Bankacılar Dergisi, Sayı 56.

Vincent F. (1997). A Comprasion of Knelson Concentrator and Jig Performance for Gold Recovery. [Master of Engineering, McGill University]

Ferreira, S., Bruns, R., Ferreira, H., Matos, G., David, J., Brandao, G., Dos Santos, W. (2007). *Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods*. Analytica Chimica Acta, Vol. 597, pp. 179-186.

Fleming, C. A. (1992). *Hydrometallurgy of precious metals recovery*. Hydrometallurgy, 30(1–3), 127–162.

Forrest, K., Yan, D. ve Dunne, R. (2001) *Optimum of Gold Recovery By Selective Gold Flotation for Copper — Gold — Pyrite Ores*, Mineral Engineering, 14(2), 227-241.

Gionet, P., (1963) Analysis of Variance. Worldwide: SAE International. Erişim Adresi: http://www.sae.org/technical/papers/630497 Erişim Tarihi: 08.01.2023.

Gross, J., & Scott, J. W. (1927). *Precipitation of gold and silver from cyanide solution on charcoal* (Vol. 378). US Government Printing Office.

Gupta, V., Parsad, R. (2012). *Fundamentals of Design of Experiments.* Statistical Manual, 2, 9-41.

Güner, M.K. (2020), *Yüksek Refrakter Altın Cevherinin Flotasyon Sonrası Diagnostik Liç İle Karakterize Edilmesi*. [Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü]

Güral, G. (2003). *Gazaltı Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu*. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

Habashi, F., Celep, O. (2013*). Altın Metalurjisinde Yeni Gelişmeler*. Madencilik, 52(1), 3-17.

Habashi, F. (1987). *One hundred years of cyanidation*. Can. Min. Metall. Bull., 80, 108–114.

Harrell, J.A. and V.M. Brown, 1992, The world's oldest surviving geological map – the 1150 BC Turin papyrus from Egypt; Journal of Geology, cilt 100 (1992), s. 3-18.

Hilson, G., Monhemius, A.J. (2005). *Alternatives to Cyanide in the Gold Mining Industry: What Prospects for the Future*, Journal of Cleaner Production, 14(12-13), 1156-1167.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Huang, L. (1996). *Upgrading of Gold Gravity Concentrates: A Study of the Knelson Concentrator* [Doctoral dissertation, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University]

Luftig J. T. & Vordan V. S. (1998). *Design of Experiments in Quality Engineering*, McGraw-Hill

Knelson, B. Jones, R. (1993). *A New Generation of Knelson Concetrators a Totally Secure System Goes on Line*, Mineral Engineering, 7, 201-207.

Komnitsas, C., Pooley, F. D. (1989). *Mineralogical characteristics and treatment of refractory gold ores*. Minerals Engineering, 2(4), 449–457.

Kongold, K., Mwema, M. D. (1998) *The Extractive Metallurgy of Gold*, Hyperfine Interactions, 111, 281-289. DOI : 10.1023/A:1012678306334

Kökkılıç, O. (2011). *Falcon Santrifüjlü Gravite Ayırıcısında Zenginleştirmenin Modellenmesi* [Doktora tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü]

La Brooy, S. R., Komosa, T. (1992), *Oxidant addition during gold ore processing*. International Conference on Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals, 147.

La Brooy, S.R., Linge H.G., Walker G.S. (1994). *Review of Gold Extraction From Ores, Minerals Engineering*, 7(10) 1213-1241.

Laplante, A.R., Woodcock F., Noaparast M. (1995). *Predicting gravity seperation gold recovery*, Mining, Metallurgy & Exploration, 12, 75-79. DOI: 10.1007/BF03403081

Ling, P., (1994). *A Kinetic Study of Gold Ore by Cyanidation* [Master of Science, University of Toronto]

Loroesch, J., Griffiths, A., Knorre, H. (1989) *Developments in gold leaching using hydrogen peroxide.* Min. Eng., 41(9), 963–965.

Marsden, J., & House I. (2006). *The chemistry of gold extraction*. SME, 2006

Magumbe, L., (2002). *Process Desing for Gold Recovery from The Chester Deposit* [Master of Science, Lisans Tezi, Laurentian University]

Majumder, A., Barnwal, J., (2006). *Modeling of enhanced gravity concentrators–present status*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 27(1): 61-86.

Martinez-L, A., Uribe, S., Carrilo, F.R., Coreno J., Ortiz, J.C. (2003), *Study of celestite flotation efficiency using sodium dodecyl sulfonate collector: factorial experiment and statistical analysis of data*, International Journal of Mineral Processing, 70, 83-97. DOI: 10.1016/S0301-7516(02)00152-7

McLeavy, M.J. (2005). *Continuous centrifugal concentrator operation and control* [Doctoral Dissertation, University of British Columbia]

Monhemius, A. J. (1992). *Recent applications of peroxygen reagents in hydrometallurgy*. Mineral Procesing and Extractive Metallurgy Review, 8(1–4), 35–46.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Montgomery, D. C. (2009). *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley&Sons

Montgomery, D.C. (2012). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.

Montgomery, E., Bronner, M. P., Goldblum, J. R., Greenson, J. K., Haber, M. M., Hart, J., Robert, M. E. (2001). *Reproducibility of the diagnosis of dysplasia in Barrett esophagus: a reaffirmation*, Human pathology, 32(4): 368-378.

Myers, R. (1971). *Response Surface Methodology*. Allyn and Bacon

Nesset, J.E. (2011). *The Canadian Metallurgical & Materials Landscape 1960 to 2011*, Golden Anniversary of the Conference of Metallurgists, Westmount, Montreal, Quebec, Canada, 241-293.

Oluklulu, S. (2014). *Çayırhan Bölgesi Linyitleri Kullanılarak Multi-Gravite Seperatörü Çalışma Parametrelerinin İstatistiksel Yöntemle Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

Oluklulu, S., Koca, S., (2018a), *Modeling some of the operational parameters of MGS for lignite cleaning by full factorial design methodology*, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1520-1531

Oluklulu, S., Koca, S. (2018b), *Tam Faktöriyel Tasarımın MGS ile Kömür Zenginleştirmeye Uygulanması*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 117-122

Oluklulu, S. (2020). *İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

Osseo-Asare, K. A., Afenya, P. M., Abotsi, G. M. K. (1984). *Carbonaceous Matter in Gold Ores: Isolation, Characterization and Adsorption Behavior in Aurocyanide Solutions*. Metallurgical Soc of AIME, pp. 125–144.

Öney, Ö. ve Samanlı, S. (2017). *Knelson Konsantratörlerin Deneysel ve Endüstriyel Uygulamaları*, 6. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı, 177-189.

Öney, Ö. (2012). *İnce tane boyutundaki Zonguldak kömürlerinin zenginleştirilebilirliğinin araştırılması*, [Doktora tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir].

Özbek, M. (1998). *Çayönü'nde Kafatası Delgi Operasyonu*; Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi, Cumhuriyetimizin 75. Yılı Özel Sayısı, s. 109-126.

Peacocke &Simpson, 2016, peacockesimpson.com Erişim Adresi: https://peacockesimpson.com/portfolio/gravity/ Erişim Tarihi: 08.12.2022.

Parekh, B. K. ve Abdel Khalek, M. A. (2002). *Mısır Kömürlerinden Çevreyi Kirleten Bileşenlerin Uzaklaştırılması için Falcon Zenginleştiricisi Kullanımı*, The Journal of Ore Dressing, 4,7 20-28.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Piga, L., Massacci, P. and Recinella, M. (1998). *Factorial experiments for selective leaching of zinc sulphide in ferric sulphate media*, International Journal of Mineral Processing, 53, 213-22.

Ren, X., Li, Q., Zhang, Y. ve Liu, D. (1994). *A New Centrifugal Seperator for Recovering Minerals from Fine and Ultrafine Sizes*, Innovations in Minerals Processing, Sudbury, 349-355.

Qu, X., Wu, C. (2005). *One factor at a time designs of resolution*. V. Journal of Statistical Planning and Inference, Vol. 131, pp. 407-416.

Saat, M. (2000). *Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı*, G.Ü. İİBF Dergisi, 3, 2000, s. 97-108.

Sağol, E. (2015). *İstatistiksel Deney Tasarımının Çayırhan Bölgesi Linyitlerinin Flotasyonunda Uygulanması*, [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

Sarıkaya, S. (2018). *Bir Altın Cevherinde Başlıca İşlem Parametrelerinin Liç Verimine Etkilerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi]

Seyrankaya, A. (2001). *Investigation of Solubility Kinetics of Gold-Bearing Arsenopyrite Ores in Cyanide Solution* [Doktora Tezi, D Dokuz Eylül Üniversitesi]

Simate, S.G., Ndlovu S. (2008) *Bacterial leaching of nickel laterites using chemolithotrophic microorganisms: Identifying influential factors using statistical design of experiments*, International Journal of Mineral Processing, 88, 31-36.

Şahbaz, O. (2013). *Determınıng optimal conditions for lignite flotation by design of experiments and the halbich upgrading curve*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49, 535-54.

Şen, S. (2000). *An Investigation on The Recovery of Gold Ores by Flotation and Coal-Oil-Gold Agglomerate Flotation* [Yuksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]

Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı*. Literatür Yayınları.

Veglio, F. and Belardi, G., 2000, Multivariate analysis supporting factorial experiments: a case study in the physical seperation of chromite fines by a multigravity separator, Seperation Science and Technology, 35(1), 109-132.

Wills, B.A. & Napier-Munn, T. (2006). *An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Wills' Mineral Processing Technology, 267-352.

Wills, B.A., 1997, Mineral Processing Technology, Butterworth-Heinemann Press, Londra.

Xiao, J. (1998). *Testing a New Gold Centrifugal Concentrator*, [Master of Science, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University].

Yalçın, Ü. ve İpek, Ö. (2012). *Anadolu'nun İlk Madencileri*. Aktüel Arkeoloji, Sayı 26, s. 46-48.

Yannopoulos, J. C. (1991) The Extractive Metallurgy of Gold Extractive of Gold. Springer

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yerriswamy, P., Majumder, A. K., Barnwal, J. P., Govindarajan, B., Rao, T. C. (2003). *Study on Kelsey jig treating Indian coal fines*, Mineral processing and Extractive metallurgy, 112(3):206-210.

Yüce, A. E. (1995). *Altın Gümüş İçeren Sülfürlü Bakırlı-pirit Cevherlerinden Tiyoüre Liçi ile Altın ve Gümüş Kazanımı* [Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü]

Yüce, A E. (2014). *Cevher hazırlama el kitabı*. G. Önal, G. Ateşok, K. T. Perek (Eds.) Cevher Hazırlama El Kitabı içinde (1st ed., pp. 425–450). Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı.

Zhang, Y., Fang, Z., Muhammed, M. (1997). *On the solution chemistry of cyanidation of gold and silver bearing sulphide ores*. A critical evaluation of thermodynamic calculations. Hydrometallurgy, 46(3), 251–269.